

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MEJORAMIENTO DE LA TENACIDAD DEL HORMIGÓN DE
ALTA RESISTENCIA CON LA ADICIÓN DE FIBRA DE
POLIPROPILENO/POLIETILENO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
CIVIL, MENCIÓN ESTRUCTURAS.**

FANNY ROCÍO GUAMÁN PILATUÑA
fannylu_cy_21@hotmail.com

JULIA EDITH PILATASIG CAIZAGUANO
julia_edith_pc@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MBA. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA.
german.luna@epn.edu.ec

Quito, Junio 2015

DECLARACIÓN

Nosotras, Fanny Rocío Guamán Pilatuña, Julia Edith Pilatasig Caizaguano, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

FANNY GUAMÁN PILATUÑA

JULIA PILATASIG CAIZAGUANO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fanny Rocío Guamán Pilatuña Y Julia Edith Pilatasig Caizaguano, bajo mi supervisión.

GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios por permitirme vivir esta maravillosa experiencia, en la que se presentaron muchos momentos de debilidad, pero de los cuales pude salir adelante gracias a su guía y compañía, que me llenaban de fortaleza.

A mis padres, María y José, por ser un gran ejemplo de trabajo y lucha, quienes además siempre me apoyaron en mis ideales, por más locos que estos parecieran. A todos y cada uno de mis hermanos, quienes supieron brindarme una palabra de aliento cuando más lo necesité.

Gracias de todo corazón, a mi compañera, amiga, quien ha llegado a ser una hermana más, Julia, gracias por brindarme tu sincera y valiosa amistad, además por ser parte fundamental de la culminación de este sueño que un día nos aventuramos a realizar.

Al director de tesis, Ing. Germán Luna por su paciencia, dedicación y tiempo que prestó a este proyecto de investigación. Gracias a su guía pudo salir adelante y terminar de la mejor manera posible.

A la Escuela Politécnica Nacional y en especial a la Facultad de ingeniería Civil y Ambiental por abrirnos sus puertas, en sus aulas conocí a personas maravillosas que siempre llevo en mi corazón.

Un agradecimiento especial a la Ing. Mercedes Villacís quien nos abrió las puertas del Laboratorio de Ensayo de Materiales, Suelos y Rocas, y permitió hacer uso de las instalaciones y equipos con los que se realizaron todos los ensayos requeridos, quien además nos dio la oportunidad de ser parte de la linda familia LEMSUR. Así mismo al Ing. Paúl Zúñiga quien nos brindó su amistad y apoyo cuando más lo necesitamos.

Las palabras se vuelven insuficientes para expresar todo el agradecimiento que siento, por lo que solo puedo decir Gracias.

Fanny

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento infinito a DIOS por sujetar mi mano en mis momentos más felices y en aquellos de llanto, por ayudarme a aumentar mi fe cuando las experiencias parecen interminables y por bendecirme constantemente con el milagro de su amor, materializado en el regalo diario de la calidez de mi familia, la alegría de mis amigos, y la bendición del estudio y el trabajo.

A mis padres, Rubén y Mercedes que con sus luchas diarias, sus enseñanzas, el apoyo incondicional y las palabras precisas han sido ejemplo y fortaleza para sus hijas y nietos. Los amo.

A mis ñañ@s Jenny, Ana, Gaby, Taty, Kleber, Christian y Xavier; y, a mis enanos, a todos y cada uno, que con su amor, han hecho de este camino, un tramo más corto.

A mis amigas y cómplices, Romy, Amparito, Diana y Vane, en especial a Fanny, amiga inigualable, sin ti no habría sido posible esta meta, gracias por ser el complemento a mi “desatino”, gracias por llorar y reír conmigo.

A Paúl, más que jefeazo, un amigo; gracias por tu tiempo, consejo, por enseñarme que la esencia de una persona es su corazón y sobre todo por la paciencia.

Al equipo LEMSUR, en el que he podido encontrar nuevas amistades, July, Iván, Liss, José A., Juan, Giss, Luis, Ing. Gustavo y Hamilton, en especial a los Ings. Germán Luna y Mercedes Villacís por las oportunidades brindadas. Gracias por todos esos recuerdos con final feliz.

A todas las personas que con su ayuda y colaboración desinteresada han hecho posible la realización de este trabajo de investigación.

Gracias de todo corazón, porque todos y cada uno forman una parte esencial de mi vida.

JULIA EDITH.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primero a Dios, porque sin su guía nada es posible, además por darme salud y fortaleza.

A mis a mis padres, por su entrega y apoyo incondicional, y no dejar que me rinda bajo ninguna circunstancia.

A mis hermanos, hermanas por su cariño y comprensión en tiempos difíciles.

Los quiero mucho.

Fanny

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, el director de mi vida,

A mis Padres, hermanas, sobrinos y cuñados,

Por las muestras de su amor y el regalo de sus palabras justas,

Impulso indispensable durante mi vida y en especial en el transcurso de

La consecución de este trabajo.

Los amo mallillos.

JULIA EDITH

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XIX
RESUMEN.....	XXVI
ABSTRACT.....	XXVIII
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.5 ALCANCE.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	10
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 ANTECEDENTES DEL H.A.R.....	11
2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	11
2.3.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	11
2.3.2 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE.....	18
2.3.3 ESFUERZO A FLEXIÓN.....	20
2.3.4 ESFUERZO A CORTANTE.....	22

2.3.5	TENACIDAD.....	25
	CAPÍTULO 3.....	28
	MATERIALES.....	28
3.1	INTRODUCCIÓN.....	28
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA H.A.R.....	29
3.2.1	CEMENTO PORTLAND.....	29
3.2.2	AGREGADO FINO.....	31
3.2.3	AGREGADO GRUESO.....	33
3.2.4	ADITIVOS QUÍMICOS.....	34
3.2.5	AGUA DE MEZCLADO.....	36
3.3	OTROS COMPONENTES.....	36
3.3.1	MATERIALES CEMENTANTES.....	36
3.3.2	FIBRAS VEGETALES.....	36
3.3.3	FIBRAS ARTIFICIALES.....	37
3.3.4	FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	39
3.3.5	FIBRAS METÁLICAS.....	40
3.4	MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.....	40
3.4.1	CEMENTO.....	40
3.4.2	AGREGADO FINO.....	42
3.4.3	AGREGADO GRUESO.....	45
3.4.4	ADITIVOS QUÍMICOS.....	47
3.4.5	FIBRA DE POLIPROPILENO/POLIETILENO.....	49
	CAPÍTULO 4.....	52
	DOSIFICACIÓN.....	52
4.1	INTRODUCCIÓN.....	52
4.2	RECOPIACIÓN DE NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA DISEÑO DE MEZCLAS DE H.A.R.....	54
4.2.1	REQUISITOS DE DESEMPEÑO DEL H.A.R.....	54
4.2.1.1.	Edad de Prueba.....	55
4.2.1.2.	Resistencia Requerida.....	56
4.2.2	INFLUENCIA DE LA RELACIÓN A/C PARA INCREMENTO DE RESISTENCIA.....	58

4.2.3	PROPORCIONES Y PORCENTAJES DE DOSIFICACIÓN.....	59
4.2.4	PROCEDIMIENTO PARA LA DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS H.A.R.....	60
4.2.5	EJEMPLO DEMOSTRATIVO PARA DOSIFICACIONES DE H.A.R.....	68
4.2.6	MEZCLAS DE PRUEBA.....	70
4.2.6.1	Dosificación 1: 0.5% de aditivo fluidificante.....	72
4.2.6.2	Dosificación 2: 1.0% de aditivo fluidificante.....	77
4.2.6.3	Dosificación 3: 1.0% de aditivo reductor de agua.....	79
4.2.6.4	Dosificación 4: 1.5% de aditivo reductor de agua.....	80
4.2.6.5	Rangos de Aceptación de los Resultados del Ensayo a Compresión.....	84
4.2.7	MEZCLAS DEFINITIVAS.....	87
4.2.8	ENSAYOS EN HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.....	95
4.2.8.1	Asentamiento (NTE INEN 1578:2010).....	95
4.2.8.2	Determinación de Contenido de Aire (ASTM C231/C231M-14).....	102
	CAPÍTULO 5.....	108
	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	108
5.1	INTRODUCCIÓN.....	108
5.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS COMPONENTES.....	109
5.2.1	AGREGADO GRUESO.....	109
5.2.1.1.	Granulometría.....	109
5.2.1.2.	Peso Específico y Absorción.....	115
5.2.1.3.	Densidades Aparentes.....	118
5.2.1.3.1.	Densidad aparente suelta.....	119
5.2.1.3.2.	Densidad aparente compactada.....	120
5.2.1.4.	Contenido de Humedad.....	124
5.2.1.5.	Resistencia a la Abrasión.....	126
5.2.1.5.1.	Coeficiente de Uniformidad.....	129
5.2.2	AGREGADO FINO.....	130
5.2.2.1.	Granulometría.....	130
5.2.2.2.	Peso Específico y Absorción.....	135
5.2.2.3.	Densidades Aparentes.....	139
5.2.2.3.1	Densidad aparente suelta.....	140

5.2.2.3.2	Densidad aparente compactada.....	140
5.2.2.4.	Contenido orgánico en arena.....	142
5.2.3	CEMENTO.....	145
5.2.3.1.	Densidad Real.....	145
5.2.3.2.	Densidades Aparentes.....	147
5.2.3.2.1.	Densidad Suelta.....	147
5.2.3.2.2.	Densidad Compactada.....	148
5.2.3.3.	Consistencia Normal.....	150
5.2.3.4.	Tiempos de Fraguado.....	154
5.3	ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	156
5.3.1	PROBETAS CILÍNDRICAS.....	156
5.3.2	VIGUETAS.....	157
5.3.3	MOLDEO DE ESPECÍMENES.....	158
5.3.4	CURADO DE LOS PROBETAS.....	160
5.3.4.1.	Curado Inicial.....	160
5.3.4.2.	Curado final.....	161
5.3.5	NÚMERO DE ESPECÍMENES.....	162
5.4	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL H.A.R...162	
5.4.1	ROTURA POR COMPRESIÓN.....	163
5.4.2	ROTURA A FLEXOTRACCIÓN.....	166
5.4.3	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE.....	170
5.4.4	DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN.....	173
5.4.4.1.	Galgas Extensométricas.....	175
5.4.5	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	176
	CAPÍTULO 6.....	178
	RESULTADOS.....	178
6.1	INTRODUCCIÓN.....	178
6.2	ENSAYO ROTURA A COMPRESIÓN.....	179
6.3	DETERMINACIÓN DE LA ROTURA A FLEJO TRACCIÓN.....	188
6.4	ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE.....	196
6.5	ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN.....	204

6.6	ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	216
6.7	ANÁLISIS DE VARIABLES QUE PUEDEN AFECTAR AL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	228
6.8	RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE FIBRA ADICIONADA Y EL ASENTAMIENTO.....	237
6.9	COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE COSTOS ENTRE MEZCLAS DE H.A.R CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRAS.....	240
6.10	CONCLUSIONES.....	244
6.11	RECOMENDACIONES.....	251
6.12	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	253

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores de Resistencia a Flexotracción a partir de la Resistencia a Compresión en función de la Ec. 2.13.....	22
Tabla 2.2 Valores de Resistencia a Corte en función de la Resistencia a Compresión a partir de la Ec. 2.15	24
Tabla 2.3 Valores de Resistencia a Corte en función de la Resistencia a Compresión a partir de la Ec. 2.16.....	24
Tabla 4.1 Resistencia Promedio a la Compresión Requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una Desviación Estándar de la Muestra.....	57
Tabla 4.2 Revenimiento recomendado para concretos con y sin HRWR.....	60
Tabla 4.3 Tamaño Máximo sugerido para el agregado grueso.....	61
Tabla 4.4 Volumen recomendado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón (m^3/m^3).....	62
Tabla 4.5 Primera estimación del requisito del agua de mezclado y contenido de aire del concreto fresco con base en el uso de una arena con 35% de vacíos.....	64
Tabla 4.6 Relación $w/(c+p)$ máxima recomendada para concretos elaborados sin HRWR.....	65
Tabla 4.7 Relación $w/(c+p)$ máxima recomendada para concretos elaborados con HRWR.....	66
Tabla 4.8 Ensayos de Compresión en probetas elaboradas con mezclas de prueba para evaluación de aditivo (0.5% Fluidificante).....	77
Tabla 4.9 Ensayos de Compresión en probetas elaboradas con mezclas de prueba para evaluación de aditivo (1.0% Fluidificante).....	79
Tabla 4.10 Ensayos de Compresión en probetas elaboradas con mezclas de prueba para evaluación de aditivo (1.0% Reductor de agua).....	80
Tabla 4.11 Ensayos de Compresión en probetas elaboradas con mezclas de prueba para evaluación de aditivo (1.5% Reductor de agua).....	82
Tabla 4.12 Porcentajes de agregados grueso, fino y cemento utilizados para la mezcla patrón.....	84

Tabla 4.13	Rango Aceptable de Resistencia de Cilindros para mezclas con 0.5% (Fluidificante).....	85
Tabla 4.14	Rango Aceptable de Resistencia de Cilindros para mezclas con 1.0% (Fluidificante).....	85
Tabla 4.15	Rango Aceptable de Resistencia de Cilindros para mezclas con 1.0% (Reductor).....	86
Tabla 4.16	Rango Aceptable de Resistencia de Cilindros para mezclas con 1.5% (Reductor).....	86
Tabla 5.1	Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso.....	111
Tabla 5.2	Requisitos de gradación del árido grueso.....	112
Tabla 5.3	Serie Tyler de Tamices Agregados Gruesos.....	113
Tabla 5.4	Resultados del Análisis Granulométrico del agregado grueso.....	114
Tabla 5.5	Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso.....	117
Tabla 5.6	Resultados de Peso específico y absorción del agregado grueso Pifo.....	118
Tabla 5.7	Capacidad nominal de molde.....	123
Tabla 5.8	Resultados de densidades aparentes del agregado grueso.....	123
Tabla 5.9	Masa de la muestra del agregado en función del tamaño máximo nominal, para obtener contenido de humedad.....	125
Tabla 5.10	Gradación de la muestra de ensayo.....	129
Tabla 5.11	Carga abrasiva en función de la gradación de la muestra.....	129
Tabla 5.12	Resultados de Resistencia a la abrasión del agregado grueso.....	130
Tabla 5.13	Requisitos de gradación del árido fino.....	132
Tabla 5.14	Serie Tamices Agregados Finos.....	133
Tabla 5.15	Resultados de granulometría Agregado Fino.....	134
Tabla 5.16	Resultados de Peso específico y Absorción Agregado Fino.....	139
Tabla 5.17	Resultados de Densidades Aparentes agregado Fino.....	142
Tabla 5.18	Placa orgánica de colores Gardner.....	144
Tabla 5.19	Resultados del Ensayo de Contenido Orgánico del Agregado Fino.....	144
Tabla 5.20	Resultados del Ensayo Densidad Real para el Cemento Selvalegre Tipo IP.....	147

Tabla 5.21	Resultados del Ensayo Densidades Aparentes para el Cemento.....	150
Tabla 5.22	Resultados del Ensayo de Consistencia Normal del Cemento.....	154
Tabla 5.23	Resultados del Ensayo Tiempos de Fraguado del Cemento.....	156
Tabla 5.24	Tolerancia de tiempo admisible para el ensayo de especímenes.....	164
Tabla 5.25	Factor de corrección según la relación de longitud al diámetro del espécimen.....	166
Tabla 6.1	Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón sin adición de Fibra (H. Patrón).....	179
Tabla 6.2	Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón con adición de Fibra con tasa 2kg/m ³	180
Tabla 6.3	Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón con adición de Fibra con tasa 5kg/m ³	181
Tabla 6.4	Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón con adición de Fibra con tasa 8kg/m ³	182
Tabla 6.5	Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón con adición de Fibra con tasa 12 kg/m ³	183
Tabla 6.6	Resumen de Resultados de Esfuerzos a Compresión del Hormigón con y sin adición de Fibra.....	185
Tabla 6.7	Variación de los Esfuerzos a Compresión del H.A.R., debida a la adición de fibra, expresada en porcentaje.....	186
Tabla 6.8	Resultados del Ensayo de Rotura a Flexotracción para Hormigón sin adición de Fibra.....	188
Tabla 6.9	Resultados del Ensayo de Rotura a Flexotracción para Hormigón con adición 2 kg/m ³ de fibra.....	189
Tabla 6.10	Resultados del Ensayo de Rotura a Flexotracción para Hormigón con adición de 5 kg/m ³ de fibra.....	190
Tabla 6.11	Resultados del Ensayo de Rotura a Flexotracción para Hormigón con adición 8 kg/m ³ de fibra.....	191
Tabla 6.12	Resultados del Ensayo de Rotura a Flexotracción para Hormigón con adición 12 kg/m ³ de fibra.....	192

Tabla 6.13	Resumen de Resultados de todos los Ensayos de Rotura a Flexotracción para Hormigón con y sin adición de Fibra.....	193
Tabla 6.14	Variación de la resistencia a la Flexotracción para H.A.R., respecto a la adición de Fibra, expresada en porcentaje.....	195
Tabla 6.15	Resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón sin adición de Fibra.....	196
Tabla 6.16	Resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón con adición 2 kg/m ³ de fibra.....	197
Tabla 6.17	Resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón con adición 5 kg/m ³ de fibra.....	198
Tabla 6.18	Resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón con adición 8 kg/m ³ de fibra.....	199
Tabla 6.19	Resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón con adición 12 kg/m ³ de fibra.....	200
Tabla 6.20	Resumen de resultados de la Resistencia a Cortante para Hormigón con y sin adición de Fibra.....	201
Tabla 6.21	Variación de la Resistencia a Cortante para H.A.R., debida a la adición del fibra, expresada en porcentaje.....	203
Tabla 6.22	Datos probeta para Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión sin adición de Fibra.....	204
Tabla 6.23	Resultados Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión sin adición de Fibra.....	204
Tabla 6.24	Datos probeta para Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 2kg/m ³ de fibra.....	205
Tabla 6.25	Resultados Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 2kg/m ³ de fibra.....	206
Tabla 6.26	Datos, probeta para Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 5kg/m ³ de fibra.....	207
Tabla 6.27	Resultados Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 5kg/m ³ de fibra.....	208
Tabla 6.28	Datos probeta para Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 8kg/m ³ de fibra.....	209

Tabla 6.29	Resultados Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición de 8kg/m ³ de fibra.....	210
Tabla 6.30	Datos probeta para Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición 12kg/m ³ de fibra.....	211
Tabla 6.31	Resultados Ensayo Determinación de la Tenacidad a Compresión con adición de 12kg/m ³ de fibra.....	212
Tabla 6.32	Resumen de Resultados Ensayos Determinación de la Tenacidad a Compresión con y sin adición de Fibra.....	213
Tabla 6.33	Variación de la Tenacidad a Compresión debida a la adición de Fibra, expresada en porcentaje.....	215
Tabla 6.34	Datos de probeta para Ensayo Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón sin adición de Fibra.....	216
Tabla 6.35	Datos y Resultados de la Determinación Teórica del Módulo de Elasticidad del Hormigón sin adición de Fibra.....	217
Tabla 6.36	Datos de la probeta para la Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 2kg/m ³	218
Tabla 6.37	Resultados de la Determinación Teórica del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 2kg/m ³	219
Tabla 6.38	Datos de la probeta para Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 5kg/m ³	220
Tabla 6.39	Resultados de la Determinación Teórica del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 5kg/m ³	221
Tabla 6.40	Datos de la probeta para Ensayo de Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 8kg/m ³	222
Tabla 6.41	Resultados del Ensayo Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 8kg/m ³	223
Tabla 6.42	Datos de la probeta para Ensayo de Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 12 kg/m ³	224
Tabla 6.43	Resultados del Ensayo Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón con adición de Fibra 12 kg/m ³	225
Tabla 6.44	Resumen de Resultados Ensayos Determinación del Módulo de Elasticidad.....	226

Tabla 6.45	Variación del Módulo de Elasticidad del H.A.R., debido a la adición de fibra, expresada en porcentaje.....	227
Tabla 6.46	Resultados de Esfuerzos a Compresión del H.A.R. con arena de M.F.=2.3 Arena sin lavar.....	228
Tabla 6.47	Resultados de Esfuerzos a Compresión del H.A.R. con arena M.F.=2.7 Arena Lavada.....	228
Tabla 6.48	Resumen de resultados de Esfuerzos a Compresión del H.A.R. con arena de diferentes M.F.....	229
Tabla 6.49	Resultados Esfuerzos a Compresión del Hormigón analizando la variable Aditivo.....	230
Tabla 6.50	Resultados Esfuerzos a Compresión del Hormigón analizando la variable Temperatura de Curado.....	231
Tabla 6.51	Resumen de Resultados de las variables analizadas.....	232
Tabla 6.52	Variación de la resistencia a compresión del H.A.R. a los 28 días, en diferentes variables, expresada en porcentaje.....	234
Tabla 6.53	Variación de la resistencia a compresión del H.A.R. a los 190 días, en diferentes variables, expresada en porcentaje.....	236
Tabla 6.54	Variación del Asentamiento en H.A.R. con adición de fibras.....	238
Tabla 6.55	Costo de los Materiales que componen el Hormigón, por cada metro cúbico.....	240
Tabla 6.56	Costo de las Fibras sintéticas Tuf Strand SF, por cada metro cúbico de Hormigón.....	240
Tabla 6.57	Costo por metro cúbico de H.A.R con adición de fibra.....	241
Tabla 6.58	Variación del costo del H.A.R, debido al incremento de fibra.....	242
Tabla 6.59	Resumen General de la variación de las propiedades mecánicas del H.A.R., expresada en porcentaje (%).....	242

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ensayo de Compresión en Hormigón de Alta Resistencia.....	3
Figura 2.1	Curva Esfuerzo vs Deformación para cálculo de Módulo Elástico...	14
Figura 2.2	Esfuerzo vs def. Unitaria del Hormigón.....	15
Figura 2.3	Ensayo a compresión en especímenes de 100x200 mm.....	18
Figura 2.4	Curva Resistencia vs Edad del Hormigón.....	19
Figura 2.5	Ensayo a Flexión en vigas de 100x100x400 mm.....	20
Figura 2.6	Ensayo a Corte con especímenes de 10x10x400 mm.....	22
Figura 2.7	Fallas en espécimen después del ensayo a Corte.....	22
Figura 2.8	Tipos de Agrietamiento en vigas de hormigón.....	23
Figura 2.9	Ensayo de Tenacidad en Cilindros de 100x200 mm.....	25
Figura 3.1	Distribución de las fibras en la mezcla de Hormigón.....	38
Figura 3.2	Distribución Aleatoria de las fibras en Mezcladora.....	39
Figura 3.3	Almacenaje del Cemento SELVALEGRE.....	42
Figura 3.4	Muestreo del Agregado Fino.....	45
Figura 3.5	Muestreo del Agregado Grueso.....	46
Figura 3.6	Muestra EUCON 37.....	48
Figura 3.7	Fibras de Polipropileno/Polietileno Tuf-Strand, desfibriladas.....	49
Figura 3.8	Fibras de Polipropileno/Polietileno Tuf-Strand.....	51
Figura 4.1	Agregado Fino de la Mina de San Antonio.....	53
Figura 4.2	Agregado Grueso de la Mina de Pifo.....	53
Figura 4.3	Cemento Selvalegre.....	54
Figura 4.4	Especímenes Fabricados para ser ensayados a diferentes edades.....	55
Figura 4.5	Proporciones de los componentes del Hormigón.....	73
Figura 4.6	Determinación del Asentamiento en mezclas con 0.5% de Aditivo.....	74
Figura 4.7	Determinación del Asentamiento en mezclas con 0.5% de Aditivo, con corrección de agua.....	75
Figura 4.8	Moldeo de Especímenes de 100x200 mm.....	76
Figura 4.9	Fabricación de Especímenes para Ensayo a Compresión.....	76
Figura 4.10	Determinación del Asentamiento en mezclas con 1% de Aditivo....	78

Figura 4.11	Determinación del Asentamiento en mezclas con 1% de Aditivo, para la segunda corrección.....	78
Figura 4.12	Determinación del Asentamiento en mezclas con 1% de Aditivo HRWR.....	80
Figura 4.13	Determinación del Asentamiento en mezclas con 1.5% de Aditivo HRWR.....	81
Figura 4.14	Comparación entre esfuerzos de compresión a diferentes edades de cada mezcla realizada en función del porcentaje de aditivo.....	83
Figura 4.15	Comparación entre esfuerzos de compresión a diferentes edades de cada mezcla realizada en función del porcentaje de aditivo y su proyección a los 28 días.....	83
Figura 4.16	Probetas Fabricadas con los cuatro porcentajes de Fibra.....	88
Figura 4.17	Mezcla de H.A.R con inclusión de Fibras.....	90
Figura 4.18	Determinación del Asentamiento en mezcla con Fibras.....	90
Figura 4.19	Moldeo de Especímenes Cilíndricos de H.A.R con fibras.....	91
Figura 4.20	Moldeo de Especímenes Prismáticos de H.A.R con fibras.....	91
Figura 4.21	Especímenes Cilíndricos de H.A.R con fibras.....	92
Figura 4.22	Especímenes Prismáticos de H.A.R con fibras.....	92
Figura 4.23	Curado de Especímenes de H.A.R con fibras.....	93
Figura 4.24	Ensayo a Compresión de Cilindros de H.A.R con fibras.....	93
Figura 4.25	Ensayo de Módulos de Elasticidad en H.A.R con fibras.....	94
Figura 4.26	Ensayo a Flexión, de Viguetas de H.A.R con fibras.....	94
Figura 4.27	Ensayo a Cortante, de Viguetas de H.A.R con fibras.....	95
Figura 4.28	Ensayo de determinación de la consistencia por medio del Cono de Abrams NTE INEN 1578:2010.....	97
Figura 4.29	Enrase y nivelación de la superficie de hormigón, en el Cono de Abrams.....	98
Figura 4.30	Determinación del Asentamiento mediante cono de Abrams.....	99
Figura 4.31	Asentamiento en mezcla de H.A.R sin fluidificante.....	100
Figura 4.32	Asentamiento en mezcla de H.A.R con 0.5% fluidificante.....	100
Figura 4.33	Asentamiento en mezcla de H.A.R con 1% fluidificante.....	100
Figura 4.34	Asentamiento en mezcla de H.A.R con 1% Reductor.....	101
Figura 4.35	Asentamiento en mezcla de H.A.R con 1.5% Reductor.....	101

Figura 4.36	Asentamiento en mezcla de H.A.R con adición de fibra.....	102
Figura 4.37	Contenido de Aire, equipo necesario para el Ensayo Gravimétrico.....	102
Figura 4.38	Recipiente de Medición de Contenido de Aire.....	103
Figura 4.39	Evacuación de Burbujas de Aire.....	104
Figura 4.40	Acople de Tapa en el Recipiente.....	105
Figura 4.41	Inyección de Agua.....	105
Figura 4.42	Bombeo de Aire en la cámara.....	106
Figura 4.43	Accionamiento de la llave de comunicación del depósito y el recipiente.....	106
Figura 4.44	Contenido de Aire de una Mezcla de H.A.R.....	107
Figura 5.1	Cuarteo de Agregado Grueso.....	110
Figura 5.2	Muestra colocada en la serie de tamices correspondientes.....	111
Figura 5.3	Material retenido en las diferentes mallas.....	111
Figura 5.4	Representación de los límites de gradación para la piedra #7.....	113
Figura 5.5	Curva granulométrica del agregado grueso.....	114
Figura 5.6	Lavado de árido grueso.....	115
Figura 5.7	Agregado en condición SSS y canastilla.....	116
Figura 5.8	Peso de Canastilla sumergida.....	116
Figura 5.9	Recipiente estándar para peso unitario.....	119
Figura 5.10	Procedimiento para determinar la densidad suelta para Agregado Grueso.....	120
Figura 5.11	Proceso de determinación de densidad compactada del Agregado Grueso.....	122
Figura 5.12	Agregado grueso en proceso de secado.....	126
Figura 5.13	Agregado fino en proceso de secado.....	126
Figura 5.14	Máquina de los Ángeles.....	127
Figura 5.15	Cuarteo y colocación de la muestra para el proceso de abrasión.....	128
Figura 5.16	Tamizadora para Agregado Fino y Muestra.....	131
Figura 5.17	Tamizado y determinación del peso retenido en las diferentes mallas.....	132

Figura 5.18 Representación de los límites granulométricos para agregado fino.....	133
Figura 5.19 Curva granulométrica Agregado Fino.....	134
Figura 5.20 Muestra de árido sumergida en agua.....	135
Figura 5.21 Lavado de la muestra y equipo para condición SSS.....	136
Figura 5.22 Determinación de la condición SSS.....	137
Figura 5.23 Procedimiento gravimétrico para gravedades específicas.....	138
Figura 5.24 Proceso de llenado del molde con el agregado.....	140
Figura 5.25 Proceso de llenado y compactado del agregado fin.....	141
Figura 5.26 Mezcla de la solución de Hidróxido de Sodio.....	143
Figura 5.27 Mezcla del Reactivo con la muestra.....	143
Figura 5.28 Mezcla del reactivo y agregado en reposo a las 24 horas.....	144
Figura 5.29 Proceso de la determinación de la Densidad Real del cemento....	146
Figura 5.30 Proceso de determinación de la densidad suelta del cemento.....	148
Figura 5.31 Proceso de determinación de la densidad compactada del cemento.....	149
Figura 5.32 Equipo y materiales para Consistencia Normal.....	151
Figura 5.33 Preparación de la pasta de cemento.....	152
Figura 5.34 Determinación de la consistencia normal.....	153
Figura 5.35 Penetración Aguja de Vicat Modificado.....	155
Figura 5.36 Moldes cilíndricos para probetas de hormigón.....	157
Figura 5.37 Molde cilíndrico de 100 mm de diámetro.....	157
Figura 5.38 Muestra obtenida de una parada.....	158
Figura 5.39 Moldeo de probetas en forma de vigas.....	160
Figura 5.40 Curado inicial de las probetas.....	161
Figura 5.41 Marcado y curado final de las probetas.....	162
Figura 5.42 Probetas antes del Ensayo Rotura por Compresión.....	164
Figura 5.43 Resumen fotográfico del procedimiento del Ensayo Rotura por Compresión.....	165
Figura 5.44 Probetas de Hormigón con y sin fibra después del Ensayo Rotura por Compresión.....	166
Figura 5.45 Mecanismo de aplicación de cargas para el ensayo de Rotura a Flexotracción.....	167

Figura 5.46	Probetas identificadas antes del ensayo de Rotura a Flexotracción.....	168
Figura 5.47	Ensayo de Rotura a Flexotracción en curso.....	168
Figura 5.48	Probeta después del Ensayo Rotura a flexotracción con la rotura en el centro medio.....	169
Figura 5.49	Probeta de hormigón sin fibra después de ser ensayada.....	170
Figura 5.50	Probetas de hormigón con fibra después de ser ensayadas.....	170
Figura 5.51	Aparato de corte normalizado para el Ensayo de Rotura a Flexotracción.....	171
Figura 5.52	Colocación correcta de cabezales para obtener la falla en la zona de rotura prevista.....	172
Figura 5.53	Procedimiento de Ensayo de Determinación de la Resistencia a cortante.....	172
Figura 5.54	Esquema de medida de deformación.....	173
Figura 5.55	Esquema de los Acoples de los anillos y deformímetro adaptado a cilindros de 100 x 200 mm.....	174
Figura 5.56	Esquema de un Strain Gage Metálico.....	175
Figura 5.57	Ampliación de Strain Gage colocado en el eje axial.....	176
Figura 5.58	Montaje de la probeta para el Ensayo Módulo de Elasticidad.....	177
Figura 6.1	Curva de desarrollo de la Resistencia a Compresión del Hormigón sin adición de Fibra (H. Patrón).....	180
Figura 6.2	Curva de desarrollo de la Resistencia a Compresión del Hormigón con adición de fibra 2 kg/m ³	181
Figura 6.3	Curva de desarrollo de la Resistencia a Compresión del Hormigón con adición de fibra 5 kg/m ³	182
Figura 6.4	Curva de desarrollo de la Resistencia a Compresión del Hormigón con adición de fibra 8 kg/m ³	183
Figura 6.5	Curva de desarrollo de la Resistencia a Compresión del Hormigón con adición de fibra 12 kg/m ³	184
Figura 6.6	Comparación de las Curvas de desarrollo de la Resistencia a Compresión del H.A.R sin csin y con adición de fibra.....	185
Figura 6.7	Curva comparativa de la variación de la resistencia a compresión del H.A.R., respecto a la adición de fibra.....	186

Figura 6.8	Variación de la resistencia a compresión del H.A.R, en porcentaje.....	187
Figura 6.9	Curva desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del Hormigón sin adición de fibra en función.....	189
Figura 6.10	Curva de desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del Hormigón con adición de fibra 2 kg/m ³	190
Figura 6.11	Curva desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del Hormigón con adición de fibra 5 kg/m ³	191
Figura 6.12	Curva de desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del Hormigón con adición de fibra 8 kg/m ³	192
Figura 6.13	Curva de desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del Hormigón con adición de fibra 12 kg/m ³	193
Figura 6.14	Resumen de todas las Curvas del desarrollo de la Resistencia a Flexotracción del H.A.R. con y sin adición de fibra.....	194
Figura 6.15	Gráfico Comparativo de la variación de la resistencia a flexotracción del H.A.R., respecto al incremento de fibra.....	194
Figura 6.16	Variación de la resistencia a flexotracción del H.A.R., en porcentaje.....	195
Figura 6.17	Curva del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón sin adición de fibra.....	197
Figura 6.18	Curva del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón con adición de fibra 2kg/m ³	198
Figura 6.19	Curva del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón con adición de fibra 5 kg/m ³	199
Figura 6.20	Curva del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón con adición de fibra 8 kg/m ³	200
Figura 6.21	Curva del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón con adición de fibra 12 kg/m ³	201
Figura 6.22	Curvas del desarrollo de la Resistencia a Corte del Hormigón con y sin adición de fibra.....	202
Figura 6.23	Gráfico Comparativo de la variación de la resistencia a cortante del H.A.R., respecto a la adición de fibra.....	202

Figura 6.24 Variación de la resistencia a cortante del H.A.R., en porcentaje.....	203
Figura 6.25 Curva Esfuerzo vs Deformación Axial del H.A.R. sin adición de Fibra.....	205
Figura 6.26 Curva Esfuerzo vs Def. Axial del Hormigón con adición de Fibra 2kg/m ³	207
Figura 6.27 Curva Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 5kg/m ³	209
Figura 6.28 Curva Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 8kg/m ³	211
Figura 6.29 Curva Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 12kg/m ³	213
Figura 6.30 Curvas Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con y sin adición de Fibra.....	214
Figura 6.31 Gráfico comparativo del incremento de la tenacidad del H.A.R., respecto a la adición de fibra.....	214
Figura 6.32 Variación de la tenacidad a compresión del H.A.R, en porcentaje.....	215
Figura 6.33 Curva de todos los ciclos Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón sin adición de Fibra.....	216
Figura 6.34 Curva de todos los ciclos Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 2kg/m ³	218
Figura 6.35 Curva de todos los ciclos Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 5kg/m ³	220
Figura 6.36 Curva de todos los ciclos Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 8kg/m ³	222
Figura 6.37 Curva de todos los ciclos Esfuerzo vs Deformación Axial del Hormigón con adición de Fibra 12kg/m ³	224
Figura 6.38 Gráfico de Comparación de la variación del módulo de elasticidad del H.A.R., respecto a la adición de fibras.....	226
Figura 6.39 Variación del módulo de elasticidad del H.A.R, en porcentaje.....	227
Figura 6.40 Curva del desarrollo de la Resistencia a Compresión del H.A.R, variable de Arena.....	229

Figura 6.41 Comparación de probetas moldeadas con Arena Lavada (izq.) y con arena en Estado Natural.....	230
Figura 6.42 Curva del desarrollo de la Resistencia a Compresión del H.A.R, variable de Aditivo.....	231
Figura 6.43 Curva del desarrollo de la Resistencia a Compresión del H.A.R, variable Temperatura de Curado.....	232
Figura 6.44 Comparación de las Curvas del desarrollo de la Resistencia a Compresión del H.A.R, para las variables analizadas.....	233
Figura 6.45 Probetas moldeadas con Arena Lavada (Esq. sup. izq.), Aditivo Fluidificante (esq. sup. der.) y para control de temperatura de curado...	234
Figura 6.46 Gráfico comparativo de la variación de la resistencia a la compresión en diferentes variables, a la edad de 28 días.....	235
Figura 6.47 Variación la resistencia a compresión del H.A.R a los 28 días, en diferentes variables de análisis, expresada en porcentaje.....	235
Figura 6.48 Gráfico comparativo de la variación de la resistencia a la compresión en diferentes variables, a la edad de 190 días.....	236
Figura 6.49 Variación la resistencia a compresión del H.A.R a los 190 días, en diferentes variables de análisis, expresada en porcentaje.....	237
Figura 6.50 Comparación de la variación del asentamiento en H.A.R con y sin adición de fibra.....	238
Figura 6.51 Curva de Pérdida del asentamiento por adición de fibras.....	239
Figura 6.52 Comparación de la variación del costo del H.A.R con y sin adición de fibra.....	241
Figura 6.53 Variación del costo del H.A.R en cada adición de fibra.....	242

RESUMEN

La presente investigación, desarrolla un análisis del desempeño de las propiedades mecánicas del Hormigón de Alta Resistencia, por la adición de macro fibras de Polipropileno/Polietileno. Para lo cual se consideran cuatro cantidades de adición, dentro del rango recomendado por el fabricante, esto es: 2, 5, 8 y 12 Kg/m³ de hormigón, estas cantidades se incorporaron a una mezcla estandarizada, diseñada para una resistencia característica a la compresión de 500 Kg/cm². Con dichas mezclas se han moldeado especímenes cilíndricos de 100mmx200mm para a ensayos de Compresión Simple, determinación de Módulos de Elasticidad y Tenacidad, además de probetas prismáticas de sección transversal de 100x100 mm y longitud de 400 mm para ensayos de Rotura a Flexotracción y Determinación de la Resistencia a Cortante; con lo cual se ha evidenciado, bajo el estudio y manejo de todos los valores obtenidos en laboratorio, que una cantidad definida de adición de fibra no mejora todas las propiedades mecánicas del H.A.R, por lo que debe analizarse cada adición en función de las necesidades estructurales, sean estas de Flexión, Corte o Rigidez; respecto a la Resistencia a Compresión Simple, la adición excesiva de fibras hacen que disminuya. El comportamiento de los especímenes además muestra que a mayor adición de fibra, dentro del rango utilizado, mejoran ciertas características mecánicas en estado endurecido, pero se afectan propiedades en estado fresco, como la trabajabilidad, comprobándose que se requiere mayor energía de compactación al momento de la conformación de elementos. Además, se analizaron las posibles variables que interfieren con el desarrollo de la resistencia en el H.A.R, como son: Módulo de Finura de la Arena, Tipo de Aditivo HRWR utilizado y Temperatura de Curado, proceso con el cual se concluye que la temperatura de curado es decisiva en el desarrollo de la resistencia a la compresión, especialmente a edades tempranas.

Palabras Clave: Hormigón de Alta Resistencia, Fibras, Compresión, Cortante, Tenacidad, Módulo de Elasticidad.

ABSTRACT

This investigation, development and analysis of the performance variation of the High Strength Concrete mechanics properties, by polypropylene/Polyethylene macro fiber addition. For this, four addition quantities are considered, in the producer recommended range, namely: 2, 5, 8 y 12 Kg/m³ of concrete, this quantities was incorporated in a standard mix. This mixture was designed for a characteristic compressive strength of 500 Kg/cm². Cylindrical specimens (100 mm x 200 mm) were molded with this mixes, and it were used for Simple Compressive Strength and Determination of Modulus of Elasticity; also, prismatic test tubes with 100 x 100 mm in its transversal section and 400 mm length were made for flexural tensile strength test and shear strength. The analysis of all values obtained in the laboratory has been showing that a determined quantity of fiber is profitable in different concrete mechanic properties, but if quantities over 12 kg/m³ of fiber were in the concrete mix, the strength compression would tend to decrease. However, more fiber added to the concrete mix can give better characteristics in hardened status, but during the mixed other properties can affect, for example, the consistence; for this reason is necessary apply more compaction energy when elements are being formed.

The possible variables, that influencing in the strength development in this concrete type, were analyzed in this investigation, as they are fine aggregated fineness Modulus, type of HRWR additive used and curing temperature. About this process, is possible to insure, that this concrete type is sensitive at curing method, the curing temperature affect the compressive strength development, and it has been considering like crucial, especially at early ages.

Keywords: High Resistance Concrete, Fiber, Compression, Shear, Flexion, Toughness, Elasticity Modulus.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de desarrollar obras de gran envergadura como edificios de gran altura, en los que las secciones de las columnas y otros elementos estructurales resultarían con dimensiones exageradamente grandes en sus bases, generaría una disminución del espacio utilizable y aumentando costos respecto a la armadura que debería ser colocada en secciones de tales magnitudes; incluso la prefabricación de elementos para puentes de grandes luces, pavimentos, pisos industriales y demás obras importantes en la cotidianidad de la sociedad, como vía para mejorar el nivel de vida de la población se verían afectados, esto ha llevado al continuo estudio y experimentación de materiales, tanto de forma individual como en conjunto, es decir, mediante la combinación de aquellos obtener materiales compuestos, con nuevas y mejores características que puedan satisfacer los requerimientos constructivos.

Como caso particular, y con motivo de sus recientes cambios urbanísticos, el Distrito Metropolitano de Quito, ha sufrido una de las transformaciones más significativas dentro del ámbito territorial, cambios que se basan en fenómenos sociales, económicos y políticos.

Esta reorganización se plantea en el proyecto denominado "*Ordenanza Especial Bicentenario para la consolidación del Parque de la Ciudad y el redesarrollo de su entorno urbano*"; el cual establece que cuando el actual Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, finalice sus operaciones y se traslade al sector de Tababela, se podrán construir edificios de hasta 25 pisos o 75 metros de altura permitiendo aprovechar de mejor manera el uso del suelo. Se conseguirá así el uso del espacio en forma vertical, dado que actualmente el uso en sentido horizontal

presenta restricciones, debido al desordenado crecimiento que tenido la ciudad en lo que respecta a estructuras para vivienda, principalmente.

Este importante crecimiento y nuevo planteamiento del uso del suelo está directamente relacionado con el desarrollo de la ingeniería, en el ámbito de la tecnología de materiales tradicionales de construcción y la creación de otros materiales compuestos que permitan garantizar estructuras seguras.

Junto con el paso del tiempo se han desarrollado nuevas técnicas y procedimientos en el ámbito de la construcción cuyo objetivo es hacer este proceso más eficiente y eficaz, mediante el empleo de nuevos materiales que faciliten el trabajo, disminuyan tiempos, garanticen seguridad y sirvan a la estructura en sí durante un periodo de vida útil mayor, es decir materiales de mayor durabilidad y de mejor comportamiento estructural.

Estos materiales compuestos o “composites” se generan tras la agrupación de elementos o componentes idóneos, de características adecuadas que puedan formar un mejor material más estable y de comportamiento predecible.

La tecnología del Hormigón ha ido desarrollando nuevos diseños de mezclas que den como resultados resistencias a la compresión más altas, mediante la reducción de las relaciones a/c, e incluso mediante adición de otros materiales cementantes. El hormigón que se ha venido desarrollando es el denominado HAR u Hormigón de Altas Resistencias, cuyas resistencias a la compresión especificada a los 28 días de edad se encuentren en un rango superior a 420 Kg/cm²; es importante mencionar que son escasos los estudios realizados bajo esta rama en nuestro país, pero las primeras investigaciones ya han sido desarrolladas tanto por Universidades como por empresas cuya actividad económica se centra en la fabricación de hormigón.

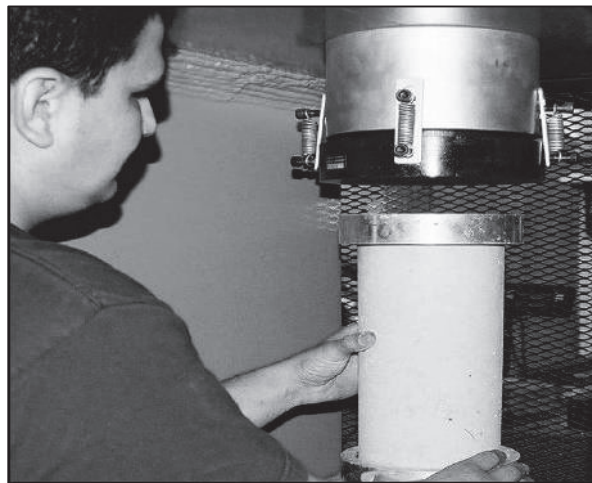
Es por esta razón que el presente estudio está dirigido a mejorar la tenacidad del hormigón de alta resistencia con la inclusión de fibras de polipropileno/polietileno, ya que al ser un hormigón seco podría presentar fallas no dúctiles.

1.2 ANTECEDENTES

El Hormigón de Alta Resistencia es un material relativamente nuevo en nuestro país, sin embargo su estudio data de 1950 y ha ido avanzando con el paso de los años en aquellos países con la tecnología disponible para este tipo de investigaciones, y su información ha sido difundida en otras latitudes con intereses comerciales.

En medio de la búsqueda de los gobiernos y demás intereses políticos de fomentar el desarrollo y satisfacer las necesidades crecientes de la población mediante obras de infraestructura, ha obligado a la industria de la construcción a desarrollar nuevas investigaciones sobre técnicas, y principalmente sobre nuevos materiales, que mejoren y garanticen la calidad de las obras; es por tanto, que el hormigón es una de las piezas clave dentro de la industria y esta es la razón suficiente para que su estudio se haya profundizado, lo que a su vez ha obligado a ir cambiando la definición del H.A.R.

FIGURA 1.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN EN HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA



Fuente: (<http://civilgeeks.com/2011/03/21/concretos-de-alta-resistencia/>)

Es importante destacar que la definición de un Hormigón de Alta Resistencia es una función de la ubicación geográfica, ya que en lugares que se comercializan

hormigones de hasta 350 Kg/cm^2 , se hace referencia a hormigones de 400 kg/cm^2 cuando se habla de un hormigón de alta resistencia; sin embargo tomado el enfoque del American Concrete Institute (ACI), se presenta a continuación una breve secuencia cronológica de la evolución de este tipo de hormigones.

En el año de 1950, se consideraban Hormigones de Alta Resistencia a aquellos que tenían resistencias a la compresión de 5000 psi (34 MPa – 346.7 Kg/cm^2); posteriormente en la década de 1960, fueron comercializados hormigones cuyas resistencias se encontraban en el rango de 6000 y 7500 psi (41 y 52 MPa – 418.1 y 530.2 kg/cm^2); y años más tarde, a inicios de la década de 1970, se producían hormigones con resistencias a la compresión de 9000 psi (62 MPa – 632.2 kg/cm^2), datos proporcionados por el comité ACI 363R-92 y aprobada nuevamente en 1997.

En años recientes se ha llegado a obtener resistencias a compresión de 20000 psi ($138 \text{ MPa} - 1407.2 \text{ kg/cm}^2$), con aplicación en edificios de gran altura con hormigones fundidos in situ.

El desarrollo del H.A.R ha sido posible gracias al creciente estudio y evolución de la tecnología de materiales, además del incremento en la demanda de hormigón y sus graduales exigencias técnicas y de usos.

El uso del H.A.R incluso de aquellos con resistencias de 6000 psi ($41 \text{ MPa} - 418.1 \text{ Kg/cm}^2$), es decir en el rango más bajo dentro de estos hormigones, era un privilegio de pocos lugares en el mundo, pero su aplicación ha ido aumentando y difundiéndose en varios países. Sin embargo en Ecuador la investigación de hormigones de alta resistencia es escasa y su demanda es baja.

A partir del 2011, con la aprobación del proyecto de *“Ordenanza Especial Bicentenario para la consolidación del Parque de la Ciudad y el redesarrollo de su entorno urbano”*, como una acción tomada ante la planificada reubicación del Aeropuerto, se empieza a evidenciar la necesidad urgente que tiene la ciudad de Quito en desarrollar un crecimiento vertical bien planificado, que contribuya a un

mejor uso del espacio disponible, mediante la construcción de edificios de gran altura, según permite dicha ordenanza de hasta 25 pisos, con menores secciones de los elementos estructurales, mayores áreas de uso, con igual o mayor densidad poblacional y mitigando así el crecimiento horizontal en la ciudad, con enfoque a la optimización del suelo disponible.

El proyecto de ordenamiento territorial antes mencionado, representa un nuevo reto para los Ingenieros constructores, diseñadores, arquitectos y demás ramas relacionadas a la obra civil ya que tienen bajo su responsabilidad concebir una metrópoli donde las edificaciones se diseñen con mayores alturas dentro de una ciudad ubicada en una zona de riesgo sísmico. El uso del H.A.R. será una herramienta necesaria para viabilizar este propósito.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Esta propuesta investigativa pretende aportar parámetros válidos y comprobados referentes al incremento de la tenacidad de los Hormigones de Alta Resistencia (H.A.R.), mediante la incorporación de fibras de polipropileno/polietileno como elemento aditivo, utilizando como base los resultados obtenidos en la tesis de los ingenieros Guadalupe-Gallegos (EPN, 2009) para que la utilización de estos nuevos conocimientos permitan avanzar en el desarrollo de otras aplicaciones tecnológicas del H.A.R.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.3.2.1.** Comprobar los parámetros físicos de materiales pétreos con los que se trabajarán los H.A.R., para certificar la regularidad de producción de las minas usadas, desde el 2009 al 2015.
- 1.3.2.2.** Establecer los porcentajes de fibras más adecuados y convenientes a incorporar en la dosificación óptima utilizada en la tesis de H.A.R de los

ingenieros Guadalupe- Gallegos.

- 1.3.2.3. Ensayar probetas de H.A.R con fibra, dosificadas para una resistencia a la compresión $f'c$: 500 Kg/cm², a diferentes edades para analizar el efecto de la inclusión de fibras sobre el comportamiento mecánico del hormigón, incluyendo su tenacidad.
- 1.3.2.4. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos para definir la dosificación con fibras más adecuada para cada parámetro.
- 1.3.2.5. Obtener el Módulo de Elasticidad como parámetro base y comparar los resultados obtenidos en cada porcentaje de fibras contra un hormigón patrón sin fibra.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el crecimiento poblacional que influye en forma directa en el ordenamiento territorial, y en el uso y ocupación del suelo sobre los que se rige el desarrollo arquitectónico y urbanístico, exigen el rápido desarrollo de técnicas constructivas y la creación de otras nuevas que den abasto a las necesidades principales de los seres humanos, como son vivienda, alimentación, educación y salud.

La Ingeniería Civil, en todas sus especialidades, busca cubrir la demanda que se presenta y exige a diario el crecimiento de la sociedad, como son las construcciones de edificios para diferentes usos, sean estos oficinas, comercio o viviendas y demás obras de infraestructura que puedan cubrir las necesidades que la población exige para garantizar un nivel de vida óptimo. El Sumak Kawsay o Plan del Buen Vivir y el cambio de la matriz productiva se inició con la gran inversión en infraestructura vial, de educación y de salud, todo esto plasmado en obras civiles con base en el hormigón.

Las diferentes obras que pueden ser realizadas dependen en gran parte de la calidad y resistencia de los materiales individuales que formarán la estructura, sean estos agregados gruesos y finos, cemento y cantidad de agua, haciendo un enfoque únicamente en los componentes de hormigón; es por esta razón que se ha presentado la necesidad de investigar nuevos materiales, o materiales compuestos, que garanticen un mejor comportamiento de las estructuras y que sea a la vez económicamente factible para aplicaciones a gran escala.

Los H.A.R permiten diseñar secciones de menores dimensiones, disminución en los tiempos de ejecución de obras, reducción en el peso de las estructuras por carga muerta y por tanto menor efecto sísmico, lo que se traduce también en mayor seguridad, pero es necesario considerar que al tratarse de un hormigón de altas prestaciones, disminuye la relación agua-cemento (a/c), generando un hormigón seco, lo que podría generar problemas con el apareamiento de fisuras por retracción plástica en los elementos fundidos con dichos hormigones. Fisuras que resultarían importantes en algunas aplicaciones como pisos industriales, represas, edificaciones de gran altura, pavimentos, etc.

Por esta razón, si no se impulsa la investigación para generar hormigones de alta resistencia con mayores tenacidades, es decir, con mayores capacidades de absorber energía hasta antes de alcanzar su colapso, no podrían ejecutarse obras de gran envergadura con las exigencias constructivas que actualmente se presentan; obras como las mencionadas anteriormente además de puentes, obras con uso de hormigón pretensado, estructuras en ambientes agresivos, vigas y demás elementos que cubran grandes luces.

Las solicitudes requieren cada vez de un hormigón que pueda prestar altas resistencias, soportar altas cargas vivas con secciones menores y otras cargas de impacto, de forma que la estructura pueda tolerarlo y generar una falla dúctil, a diferencia de lo que una estructura con hormigón convencional lo haría.

1.5 ALCANCE

Este proyecto busca aportar una dosificación de fibras adecuada para mejorar la tenacidad del hormigón de altas prestaciones o alta resistencia, a la vez que controle el fisuramiento, utilizando para su efecto materiales pétreos de las minas Fucusucu - San Antonio en la Mitad del Mundo para agregado fino, y de la mina de la empresa Holcim, ubicada en Pifo, para agregado grueso.

El diseño de las mezclas se basa en el método del American Concrete Institute, y se utilizarán fibras sintéticas TUF STRAND SF, suministradas por la empresa Toxement Euclid Chemical, que son una mezcla de polipropileno/polietileno.

Los resultados de dosificación pretenden generar una visualización previa del H.A.R de forma que sea un aporte técnico y económico a largo plazo en nuestro medio, además de que se pretende dar el primer paso en el desarrollo de nuevas tecnologías para producir hormigones de altas prestaciones con mejores características mecánicas.

La resistencia a la compresión ($f'c$) que se considerará como base para este proyecto es de 7111.50 psi (49 MPa – 500 kg/cm²), y la dosificación será realizada con agregado grueso de Tamaño Máximo Nominal de 1/2 de pulgada, proveniente de Pifo, y arena con módulo de finura 2.3 proveniente de la mina de Fucusucu - San Antonio, Mitad del Mundo.

El hormigón será moldeado en cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para realizar ensayos a compresión, y vigas de sección transversal de 10 X 10 cm y 40 cm de longitud, destinadas a ensayos de flexión y corte.

La evaluación de los agregados se realizará con base en las normas nacionales del Instituto Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN) y/o normas internacionales del American Society for Testing and Materials (ASTM); los ensayos tanto para compresión simple como para flexión y corte en los que se busca conocer los esfuerzos mecánicos del hormigón y tenacidad serán evaluados con las normas

españolas UNE que son aplicadas para hormigones con fibra; el Módulo de Elasticidad, por el contrario, será obtenido mediante Normas ASTM, establecidas para hormigones en general sometidos a compresión.

Al desarrollar investigaciones que reflejen las bondades y características que brinda el hormigón de alta resistencia, podría darse pie al incremento en la demanda y la generación de nuevas tecnologías que permitan la fabricación de este tipo de hormigones, disminuyendo costos y generando un mercado más competitivo.

Con este proceso se busca comprobar que el análisis de dosificación de Hormigón de Alta Resistencia utilizando fibras sintéticas, materiales pétreos del Cantón Quito y siguiendo el procedimiento para diseño de mezclas del ACI, mejorarán las características del hormigón de alta resistencia, tanto en sus propiedades físicas como mecánicas, contribuyendo así a la optimización del funcionamiento mismo de las estructuras.

CAPÍTULO 2

HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, hace aproximadamente 2000 años, han ido evolucionando los materiales aglutinantes; por la necesidad de mejorar su funcionamiento y darles más durabilidad han ido incorporando refuerzos como la arcilla mezclada con paja para lograr la unión de mampuestos usados en paredes, incluso en los mismos adobes hechos de forma artesanal bajo mezcla de barro agua y paja para mejorar su capacidad de absorción de energía y evitar su disgregación.

Estos materiales han ido mejorando a través del tiempo, apareciendo así el hormigón cuya propiedad representativa es su resistencia a la compresión, pero, tiene también otras propiedades importantes y que resultan ser menos eficientes, o no presentan un comportamiento óptimo, se tiene, por ejemplo, la resistencia a la tracción, la ductilidad y su capacidad para absorber energía, siendo más notorio este problema cuando el esfuerzo a compresión, f_c , o su valor de resistencia característica se eleva.

Con la intención de mejorar las características del hormigón se puede añadir otros componentes como las fibras, pudiendo ser estas vegetales, metálicas, plásticas o de vidrio. En este proyecto se ha considerado el uso de fibras artificiales plásticas de polipropileno/polietileno con el fin de poder analizar el mejoramiento del comportamiento del hormigón bajo esfuerzos de compresión, flexión y corte.

Entre las ventajas que ofrece el H.A.R, respecto a los hormigones convencionales, están: mayor durabilidad, mayor resistencia a la erosión, a la acción de sulfatos y a la abrasión, mejores resistencias mecánicas como la compresión, módulo de Elasticidad.

2.2 ANTECEDENTES DEL H.A.R.

Los Hormigones de Alta Resistencia se caracterizan por presentar menor ductilidad y menor resistencia a esfuerzos de flexión y de corte, debido a que se manejan relaciones a/c muy bajas, entre 0.25 y 0.40; razón por la cual se pretende mejorar las características de este tipo de hormigones mediante la adición de otros componentes que transfieran sus propiedades al conjunto del que formarán parte, es decir que las fibras le otorgarán mayor flexibilidad ante la presencia de esfuerzos de tracción, corte y en muchos casos, con el uso de fibra con características adecuadas, el mejoramiento de la resistencia a compresión en algún porcentaje.

Lo que es imperativo es que en este tipo de hormigones se pueda evitar las fallas explosivas que puedan, en algún momento como en el caso de un evento sísmico, generar daño a las personas que hacen uso de estructuras u otras obras de infraestructura que requieran de resistencias más altas; es decir que se debe procurar que el hormigón absorba toda la energía posible antes de su colapso.

Es por tanto indispensable mejorar la tenacidad del hormigón, para este caso en particular en el que la resistencia alcanzada es de aproximadamente 500 Kg/cm².

Las bajas relaciones a/c empleadas en los H.A.R generan, por lo regular, hormigones muy secos o poco trabajables, efecto que deberá ser corregido con el uso de aditivos plastificantes.

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

2.3.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD

La Ley de Hooke expresa que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones unitarias, dicha proporcionalidad está definida por el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

Esta propiedad del hormigón es una medida de la rigidez, que es la capacidad de oponerse a la deformación. El hormigón no es un material propiamente elástico, sin embargo en estado endurecido y bajo acciones de cargas de trabajo, es decir cargas que no exceden alrededor del 45% de las que se han previsto como de diseño, presenta una curva esfuerzo vs deformación unitaria que evidencia la proporcionalidad entre estas dos variables, es decir que dicha “curva” se acerca a una línea recta, que además marca el rango elástico del material, y que es el rango en el que el material sometido a cargas puede recuperar su forma inicial después de retirada la misma, o rango en que el hormigón trabaja bajo esfuerzos que no ocasionan la deformación permanente del material (Arequipa et. al, 2012)

Según el ACI 318-08, el Módulo de Elasticidad (E_c) para hormigones de peso unitario (w_c) entre 1440 y 2560 Kg/m³ puede estimarse como:

$$E_c = w_c^{1.5} * 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

ó

$$E_c = w_c^{1.5} * 0.137 \sqrt{f'_c} \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde,

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, kg/cm² ó MPa

w_c = Peso unitario del hormigón, kg/m³

f'_c = Resistencia a compresión del hormigón, kg/cm².

Para Hormigones de densidad normal (2260 Kg/m³), el E_c puede tomarse como:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

ó

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'_c} \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Y para hormigones de alta resistencias el módulo puede calcularse con:

$$E_c = 3320 * 3.13\sqrt{f'_c} + 69000 \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde,

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, kg/cm² ó Mpa

w_c = Peso unitario del concreto, kg/m³

f'_c = Resistencia a compresión, kg/cm²

El Módulo de Elasticidad, E_c , se define como la pendiente de la secante trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de 0.45 f'_c , donde f'_c es la resistencia a compresión de diseño de dicho hormigón.

Existen varios factores que pueden afectar significativamente esta propiedad, uno de estos y el principal es el módulo del agregado, aunque influye también la calidad de la pasta y la forma de ensayo, aun así siguen prevaleciendo las características del agregado y su composición.

El módulo E_c puede ser denominado Tangente o Secante, dependiendo de la forma en la que es calculado:

Módulo Tangente: A partir de la gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria (σ - ϵ) obtenida del ensayo de compresión a una probeta cilíndrica, se pueden trazar rectas tangentes en un punto de la curva del diagrama, entonces se denominará módulo tangente; es variable porque depende de cada punto elegido, y se mide por la inclinación de la tangente a la curva en ese punto (Arequipa et al., 2012).

$$E_c = \frac{\delta\sigma}{\delta\epsilon} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde,

$\delta\sigma$ = Diferencial de Esfuerzo, Kg/cm²

$\delta\epsilon$ = Diferencial de Deformación unitaria, mm/mm

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, kg/cm²

Cuando se toma el punto (0,0) se denomina módulo tangente inicial o módulo Inicial.

Módulo Secante: Se mide por la inclinación de la recta que une el origen con el punto considerado, por lo que su valor es variable.

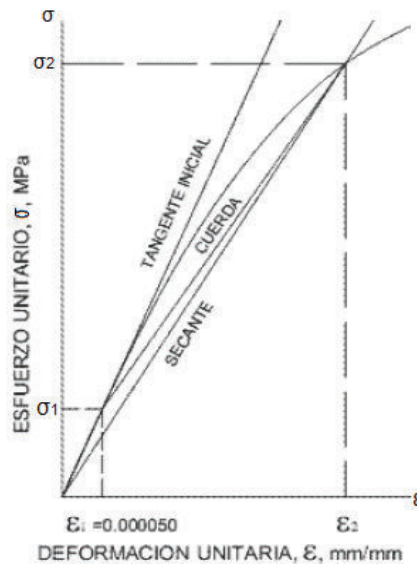
$$Ec = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde,

σ = Esfuerzo, Kg/cm²

ε = Deformación unitaria, mm/mm

FIGURA 2.1 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN PARA CÁLCULO DE MÓDULO ELÁSTICO

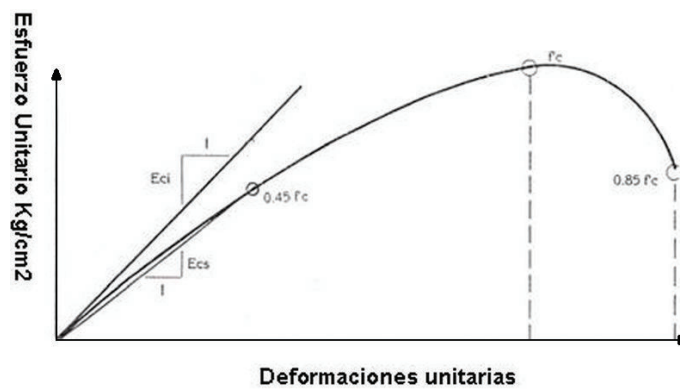


Fuente: Arequipa et al., 2012.

Para materiales totalmente elásticos el módulo de elasticidad es constante e independiente de la tensión que se aplica y usualmente se lo denomina módulo de Young, para los materiales inelásticos el módulo depende la tensión aplicada.

En general los materiales presentan los dos comportamientos, iniciando con un comportamiento elástico a medida que se le aplica una carga, sea ésta de compresión o tensión, y recupera su geometría inicial después de retirada la carga; en este rango se presenta un gráfico $(\sigma-\epsilon)$ lineal; el segundo denominado inelástico comienza cuando la tensión que se aplica es superior a la de su resistencia promedio, es decir, que el material ya no tiene oportunidad para recuperarse y volver a su forma geométrica inicial, entonces el gráfico $(\sigma-\epsilon)$ pierde su linealidad tendiendo a una curva, se puede también considerar un tercer rango de deformación en el que la carga aplicada es excesiva, y el material no absorbe más carga, sin embargo su deformación continua aumentando aun cuando la carga tiende a disminuir, el gráfico $(\sigma-\epsilon)$ se presenta entonces, curvo y descendente hasta que el material alcanza la carga de rotura o de colapso total.

FIGURA 2.2 ESFUERZO VS DEF. UNITARIA DEL HORMIGÓN



Fuente: Osorio J., 2011. Disponible en: blog.360gradosenconcreto.com

Como se mencionó, el hormigón no es un material totalmente elástico, y su comportamiento depende básicamente de los agregados y del cemento que lo constituyen, pero se puede afirmar que aquellos hormigones de menor resistencia muestran mayor capacidad de deformación que los de mayores resistencias, ya que estos últimos son diseñados con bajas relaciones a/c y son considerados hormigones secos y por tanto son más frágiles.

El hormigón conserva su linealidad o comportamiento elástico en la medida que sigue siendo un material homogéneo, condición que se pierde al aparecer las primeras micro fisuras.

Estas fisuras inician generalmente en la pasta que es la que se encarga de aglutinar al agregado grueso, pero aún después de iniciado este proceso el hormigón es capaz de seguir soportando el incremento de carga, ya que ésta es transmitida y soportada básicamente por la piedra, hasta que la pasta llega a fracturarse, lo que origina que el hormigón pierda su capacidad de carga y aumente su deformación hasta llegar a la rotura total.

Lo que respecta al comportamiento inelástico del hormigón, tiene que ver directamente con la aplicación de una carga por un período largo de tiempo lo que origina la fluencia del hormigón. Se estima que este proceso de fluencia es causado por el acomodo de la estructura cristalina de la pasta de cemento o fluencia básica y/o por la pérdida de humedad interna que origina una retracción hidráulica adicional. (Arequipa et al., 2012)

Las principales condicionantes de este fenómeno son las características del hormigón: tipo y dosis, la humedad ambiente, carga y edad del hormigón en el momento de la aplicación de las cargas.

Ley de Hooke

Esta ley es formulada básicamente para el estiramiento longitudinal de los materiales. Esta ley refiere a que este alargamiento unitario que experimenta un material elástico, es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde,

ϵ = Deformación Unitaria, mm/mm

δ = Deformación, mm

L = Longitud, mm

Esta ley se aplica en ingeniería en vista de que existen varias estructuras en las que su diseño depende de las propiedades mecánicas de los materiales que las conforman.

En ingeniería Civil, las estructuras y demás obras de infraestructura son diseñadas para trabajar a cierto nivel de esfuerzos, generado por la aplicación de las cargas consideradas en el cálculo estructural, es importante por tanto someter a pruebas a los materiales de forma que se puede obtener datos que permitan pronosticar el comportamiento, tanto del material como de la estructura, y evitar deformaciones permanentes por flujo plástico.

El módulo de elasticidad puede obtenerse de la siguiente expresión, que refleja la linealidad entre el esfuerzo y la deformación unitaria para un elemento sometido a tensión o compresión simple:

$$E = \frac{P \cdot L}{A \cdot \delta} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde,

E = Constante de proporcionalidad/Módulo de Elasticidad y es la pendiente del diagrama (σ - ε) en el rango de elasticidad, cuyo valor depende del material que se analiza, kg/cm²

P = Carga aplicada, kg

A = Área de la sección transversal de la probeta, cm²

δ = Deformación del eje longitudinal de la probeta, mm

L = Longitud de la probeta, mm

2.3.2 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE

FIGURA 2.3 ENSAYO A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE 100X200 mm



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La resistencia a la compresión (f'_c) se la define como la capacidad máxima para soportar esfuerzos de compresión simple, generados por la aplicación de una carga axial sobre probetas cilíndricas estandarizadas, usando para esto el proceso indicado en “Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Compresión en Probetas Cilíndricas de Hormigón”, según la ASTM C 39 para hormigones sin uso de fibras en su mezclado, y “Rotura a Compresión” como indica la norma UNE 83507, para hormigones con fibra.

Es importante aclarar que la resistencia del hormigón crecerá con el transcurso del tiempo e indefinidamente, y depende del curado que éste reciba en el transcurso del mismo. Generalmente la edad especificada para esta determinación en las mezclas de hormigón convencional es de 28 días, siendo ésta diferente para hormigones de alta resistencia, ya que la edad de comprobación puede prolongarse de 28 a 56 o 91 días y aún hasta un año.

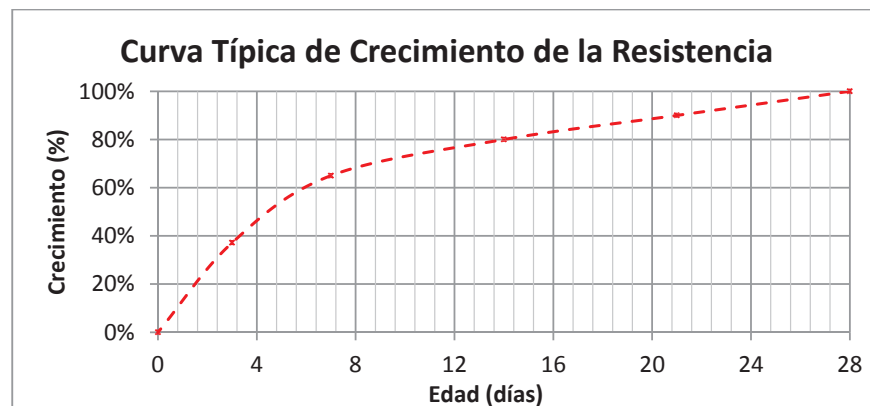
Debido a los tiempos que se marcan en la ejecución de las obras civiles, esperar a edades tan altas, superiores a un mes, no es conveniente en la práctica, por lo que se puede realizar el análisis del desarrollo de la resistencia mediante la preparación de una curva de crecimiento a edades de 3, 7, 14, 28 días o mayores,

dependiendo de las consideraciones del fiscalizador, del constructor o personal que se encuentre a cargo de verificar el cumplimiento de la resistencia de la mezcla; para de esta manera poder definir la tendencia del desarrollo de la resistencia final y estimar este valor que es indispensable para el diseño estructural, en el cual se resalta su importancia y validez práctica.

La curva debe cumplir con los valores porcentuales de crecimiento esperados respecto a la resistencia de diseño tomada como el 100%, es decir que a los 7 días deberá llegar al 65%, a los 14 días al 80% hasta su totalidad o 100% a los 28 días; en caso de los hormigones convencionales, dicha curva se cumple totalmente, sin embargo se puede esperar diferencias para el caso de Hormigones de Alta Resistencia por lo expuesto anteriormente.

Se justifica este hecho por la baja relación a/c que provocará la necesidad de mayor tiempo para el proceso de hidratación y fraguado, por ende de endurecimiento.

FIGURA 2.4 CURVA RESISTENCIA VS EDAD DEL HORMIGÓN



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Los valores de resistencia a compresión que presenta un hormigón en particular pueden variar dentro de un cierto rango, ya que dependen de numerosos factores tales como: la dosificación empleada, tipo de cemento utilizado, inclusión o no de aditivos, propiedades físicas de los agregados, relación a/c y régimen de curado; por lo que este parámetro tiene demasiada importancia para llevar un adecuado

control de calidad del hormigón y/o para verificación del cumplimiento de las especificaciones en proyectos de obra civil.

2.3.3 ESFUERZO A FLEXIÓN

FIGURA 2.5 ENSAYO A FLEXIÓN EN VIGAS DE 100X100X400 MM.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Este esfuerzo es denominado también Esfuerzo o Módulo de Ruptura (MR) y se lo determina a través de vigas de dimensiones estandarizadas, sometidas a dos cargas puntuales en los tercios medios, según el procedimiento de la norma UNE 83509 “Rotura a Flexotracción”, y también bajo la ASTM C 78 “Ensayo Estándar para determinación de la resistencia a Flexión”.

Este ensayo se lo practica en las edades que crea conveniente el personal a cargo, sean éstas a los 3, 7, 14 y/o 28 días, pero generalmente se especifica a 28 días.

Existe una manera alternativa para la determinación de este Esfuerzo, esto es a través del ensayo de la tracción indirecta que se obtiene por medio del denominado Ensayo Brasileiro, el cual consiste en someter a rotura por tracción indirecta (f_t) a un espécimen cilíndrico mediante su compresión diametral. (Camposano J. / INECYC, 2009).

Después de obtenido el valor “ f_t ” bajo norma ASTM C 496M se puede realizar una correlación con el módulo de Rotura (MR), una adecuada correlación permitirá el

uso de probetas cilíndricas en reemplazo de las viguetas que conllevan un manejo más complejo.

Según la notas técnicas del Control de Calidad en el Hormigón, del Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto Parte I, para la correlación entre el esfuerzo a compresión (f'_c), tracción por compresión diametral (ft) y tracción por Flexión (MR), se recomiendan como convenientes las siguientes expresiones:

Adam M. Neville

$$ft = 0.3 * \sqrt[3]{f'^2_c} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$MR = 1.333 * (ft) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$MR = 0.399 * \sqrt[3]{f'^2_c} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

American Concrete Institute (ACI)

$$MR = 0.392 * \sqrt[3]{f'^2_c} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Burg y Ost (1992)

$$ft = 0.61 * \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Dónde,

f'_c = Resistencia a la compresión, MPa.

MR = Resistencia a tracción por compresión diametral, MPa.

ft = Resistencia a la compresión por flexión, MPa.

TABLA 2.1 VALORES DE RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN A PARTIR DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DE LA EC. 2.13

F'c (Kg/cm²)	MR (Kg/cm²)
210	30,03
280	36,38
350	42,22
420	47,67
500	53,55
630	62,47
840	75,68

Elaborado por: F. Guamán – J. Pilatasig.

2.3.4 ESFUERZO A CORTANTE

FIGURA 2.6 ENSAYO A CORTE CON ESPECÍMENES DE 10X10X400 mm.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 2.7 FALLAS EN ESPÉCIMEN DESPUÉS DEL ENSAYO A CORTE.



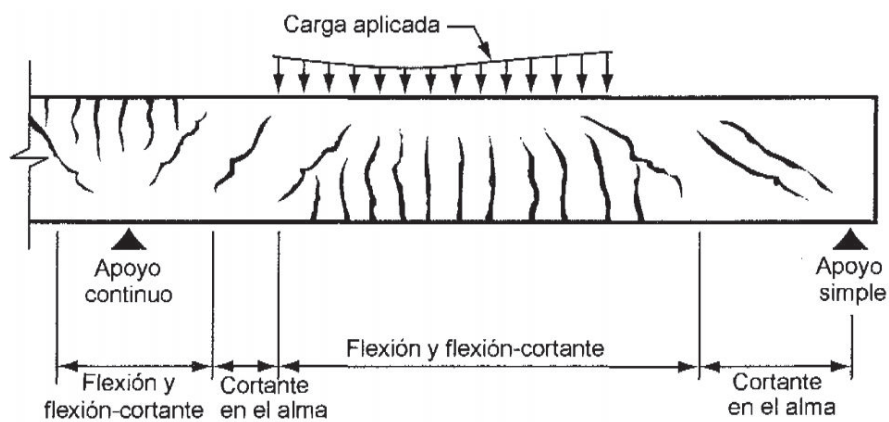
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Debido a que los mayores esfuerzos se presentan en las fibras centrales de las vigas de hormigón, aparecen fisuras que crecen rápidamente hacia los extremos superior e inferior, por esta razón se deben colocar armaduras de acero que

limiten su crecimiento, ya que inclusive pueden llegar hasta la zona superior del eje neutro que normalmente trabaja a flexión, estas armaduras de acero son estribos transversales destinados únicamente a resistir esfuerzos por cortante.

En cuanto a magnitudes se refiere, la resistencia a cortante del hormigón puede alcanzar el valor de la resistencia a tracción, esto como consecuencia de que las fuerzas cortantes se transforman en tracciones diagonales.

FIGURA 2.8 TIPOS DE AGRIETAMIENTO EN VIGAS DE HORMIGÓN.



Fuente: ACI 318-08

Según el documento redactado por el M. Sc. Romo P. Marcelo (2008) sobre Hormigón Armado, el valor del esfuerzo cortante en el laboratorio se puede determinar con la siguiente expresión:

$$V_c = \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Dónde:

V_c = Resistencia a Cortante, en Kg/cm²

f'_c = Resistencia a la Compresión del hormigón, en Kg/cm²

Valor que depende directamente de la resistencia a la compresión que tiene el hormigón.

Algunos de los valores de Resistencia a Cortante en hormigones sin fibras, de diferentes resistencias a la compresión, se presentan a continuación:

TABLA 2.2 VALORES DE RESISTENCIA A CORTE A PARTIR DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DE LA EC. 2.15

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	RESISTENCIA AL CORTE (Kg/cm ²)
210	14
280	17
350	19
420	20
630	25
840	29

Fuente: Romo P. Marcelo, 2008. Disponible en: publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-de-hormigon-armado/hormigon01.pdf

Por otra parte el ACI 318, sugiere la siguiente ecuación:

$$V_c = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Dónde:

V_c = Resistencia a Cortante, en Kg/cm²

f'_c = Resistencia a la Compresión del hormigón, en Kg/cm²

TABLA 2.3 VALORES DE RESISTENCIA A CORTE A PARTIR DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DE LA EC. 2.16

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	RESISTENCIA AL CORTE (Kg/cm ²)
210	7.68
280	8.21
350	8.87
420	9.92
630	10.86
840	11.73

Fuente: Romo P. Marcelo, 2008. Disponible en: publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-de-hormigon-armado/hormigon01.pdf

Esta última expresión indica que la Resistencia a Cortante se relaciona directamente con la raíz cuadrada de su resistencia a la compresión, siendo el 53% de ésta la que ocasiona una falla frágil, por lo que el ACI 318-08 sugiere la aplicación de esta ecuación.

El ensayo de rotura por corte busca inducir una falla pura debido a esfuerzo cortante, eliminando por completo fallas debidas a flexión durante el proceso ya que la carga y el apoyo estarán alineados. Las dimensiones de los bloques usados en este ensayo se ajustan a las medidas de la probeta estándar especificada en la Tabla 1 de la norma española UNE 83504, siendo estos bloques fabricados explícitamente para ser usado en este proceso, como indica la norma española UNE 83511; dicho proceso se ejecuta con una máquina de compresión, la cual aplica la fuerza directamente al espécimen induciendo la falla por corte.

2.3.5 TENACIDAD

FIGURA 2.9 ENSAYO DE TENACIDAD EN CILINDROS DE 100X200 mm.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La tenacidad de un material relaciona las características de deformación y la carga aplicada antes de colapsar o de llegar a su carga de ruptura, para el caso del hormigón esta propiedad depende tanto de los agregados que lo componen como de la matriz que los une, por tanto la tenacidad está definida como la energía que absorbe el hormigón antes de llegar a su colapso o ruptura total.

Gráficamente, la tenacidad se encuentra como el área bajo la curva esfuerzo vs deformación de una probeta sometida a fuerzas axiales de compresión.

Puede considerarse que esta propiedad mecánica dependa directamente de la resistencia a compresión; en el caso del hormigón, si tiene un mayor esfuerzo a la compresión, f_c , éste tiende a producir fallas menos dúctiles, por tanto, a mayor resistencia aumenta también la rigidez, esto se traduce en la disminución de la tenacidad, generada por las menores deformaciones y, consecuentemente, llegando a una falla frágil que en muchas ocasiones puede ser considerada explosiva, por la forma violenta en la que se desprenden sus fragmentos.

Es importante recalcar que la resistencia a la compresión se refiere a la capacidad de carga que tiene el hormigón sin que presente una falla o deformación permanente, es decir que se considera el rango elástico de trabajo del material; sin embargo, la Tenacidad considera la falla última, es decir, trata con deformaciones permanentes; se considera que el hormigón continuará recibiendo carga que ocasionará deformaciones irreparables y el material no podrá recuperar su forma inicial, esta propiedad considera el rango plástico del material.

Dentro del diseño de estructuras de hormigón se prevé el tipo de falla que se puede esperar, especialmente en algún evento extraordinario como son los sismos, y que es de especial importancia en países considerados de alto riesgo como el caso del Ecuador; para controlar el proceso de falla se refuerzan las estructuras con elementos de acero, lo que revela que las características del hormigón pueden ser mejoradas con la adición de otros componentes en su fabricación o en su proceso de mezclado. En vista de que el hormigón trabaja muy bien a compresión y que aporta muy poco o nada frente a esfuerzos de tensión, flexión y corte, se lo refuerza con otros componentes que le otorguen mejores características al conjunto, es decir que, por ejemplo, barras longitudinales de acero dentro de cualquier elemento mejorarán sus propiedades ante el fenómeno de flexión, previniendo una falla del hormigón debido a éste; por otro lado, se incluye también acero de refuerzo para el fenómeno de cortante en forma de estribos, con el fin de prevenir el crecimiento de fisuras que pudieran

inutilizar el elemento estructural. Pensar en que se podría reemplazar parte del acero por fibras sintéticas, no es un absurdo sino más bien el inicio de una nueva técnica que busca ser más eficiente y menos agresiva con el ambiente.

El principio fundamental del diseño estructural es conseguir la mayor deformación de la estructura y permitir su evacuación total en caso de ocurrencias sísmicas u otras calamidades, es decir que el principal objetivo es precautelar el mayor número de vidas humanas, lo que se puede lograr mejorando las cualidades y desempeño de los materiales con los que se construye actualmente, y en particular del hormigón que es el componente principal

La inclusión de fibras sintéticas busca aumentar la energía absorbida por el hormigón, redundando en la reducción de cantidad de acero o su eliminación, según el caso, generando un beneficio práctico y económico en las obras civiles.

CAPÍTULO 3

MATERIALES

3.1 INTRODUCCIÓN

Las características del Hormigón de Alta Resistencia, al igual que un hormigón convencional, dependerán de los materiales empleados en su fabricación. Ya que este proyecto, estudia al Hormigón de Alta Resistencia con fibras sintéticas y considerando que es un material compuesto, presentará variaciones en su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido.

Considerando que el mayor volumen de un hormigón es ocupado por los agregados, se busca lograr una masa de áridos lo suficientemente densa, cohesionada por la pasta de cemento, otorgándole así al hormigón características mecánicas que pueden variar de acuerdo a las características de los componentes individuales.

Según Özturan y Çeçen (1997 citado en Chan J., et. al., 2003), las características del mortero, de los agregados y de la interfase entre estos componentes definen el esfuerzo que el hormigón puede resistir. Al ser éste un material compuesto, morteros con diferentes calidades y agregados con distintas características como forma, textura, mineralogía, etc., pueden producir hormigones de distintas resistencias.

La necesidad de contar con un hormigón de calidad, y siendo aún más crítica la dosificación de un hormigón de alta resistencia, es indispensable, afirma Cerón et al. (1996 citado en Chan J., et. al., 2003), conocer de forma más detallada las características de sus componentes, ya que, tanto resistencia como durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de estos.

Es por tanto indispensable, la cuidadosa selección de los áridos que se pretende utilizar en la dosificación de un hormigón y aún más si es de alta resistencia.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA H.A.R.

3.2.1 CEMENTO PORTLAND

La norma NTE INEN 151, define al cemento Portland Puzolánico como aquel cemento hidráulico consistente en una mezcla uniforme de cemento portland o cemento portland de escoria de altos hornos y puzolana fina, mediante el molido conjunto de Clinker de cemento portland y cantidades de puzolana dentro de límites permitidos.

En la definición de puzolana considerada en la norma NTE INEN 151, ésta es concebida como un material silíceo – aluminoso, que posee poco o ningún valor cementante, pero si es finamente dividida y en presencia de humedad a temperatura ambiente, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos que poseen propiedades cementantes o aglomerantes.

La puzolana puede ser de origen Natural o Artificial (González De la Cotera, 1960).

Estos dos grupos se pueden clasificar de una forma más amplia, el Bureau of Reclamation (1952 citado en González, 1960) considera los siguientes tipos:

- I. *Arcillas y Pizarras*, las cuales requieren ser calcinadas para ser activas: Caolinita, Montmorillonita.
- II. *Materiales Opalinos*, que pueden ser o no calcinados: Tierra de Diatomeas o Diatomita, semiópalos.
- III. *Tobas Volcánicas y Pumicitas*, en las cuales la calcinación puede ser o no necesaria: Riolfíticos, Andesíticos, Fenolfíticos.
- IV. *Sub productos Industriales*: Escoria de Alto Horno, Ceniza Volante, Humo Silíceo.

En resumen, para la fabricación de cemento portland puzolánico se necesita de:

- a.- La producción de cemento portland normal o de Clinker
- b.- La puzolana de reemplazo, o adición.

En nuestro país es importante la adición de puzolanas al cemento de forma que contrarreste las acciones de sulfatos presentes en suelos y aguas freáticas, y también por mejoras de costos de producción.

Por las características que presenta la puzolana al reaccionar con la humedad se pueden solucionar algunos de los defectos que se presentan en el cemento e incluso en el hormigón debido a los residuos de cal libre.

En la combinación de agua con el cemento, se producen sales insolubles y se libera más cal en forma de hidróxido de calcio, como resultado de la reacción química; el hidróxido de calcio se acumula en cantidades importantes, hasta un 25% del volumen del cemento.

La cal libre en el cemento al humedecerse (aprox. 1%) se hincha considerablemente, la variación de este porcentaje puede ser causante de aparición de fisuras a los pocos días de finalizado el fraguado del cemento, es decir antes de que el hormigón haya desarrollado suficiente resistencia; puede también generar mayor porosidad y permeabilidad, además de producir un hormigón vulnerable a las sales de azufre o sulfatos, lo que a futuro afectará a la armadura de las estructuras que se hayan realizado con ese hormigón, dejándolas inutilizables.

La puzolana le da nuevas características al hormigón, mediante reacciones químicas con la cal, en presencia de humedad y a una temperatura ambiente. Reacciones que son tardías y contínuas con el hidróxido de calcio liberado con la hidratación del cemento.

Los nuevos compuestos que se forman son estables y con poder cementante (silicatos y aluminatos de calcio), aumentando el volumen de pasta aglomerante, disminuyen también las porosidades y le permite al hormigón ganar resistencias a edades mayores de 28 días, hasta 15-20% a los 56 días, 30% a los 120 días siempre y cuando los hormigones sigan siendo curados (Lafarge, Folleto Técnico).

Los componentes del hormigón cumplen cada uno con una función importante, generando un material compuesto eficiente y apto para usar en la fundición de estructuras, del cual dependerá la vida útil y la capacidad de carga que tengan las mismas.

Acorde al ACI 211.4R, el cemento es entonces, una parte muy importante del hormigón, la selección del tipo y la fuente del mismo, para la fabricación de H.A.R., serán de suma importancia, debido a que los cambios que presente su composición química y sus propiedades físicas afectarán directamente la resistencia del hormigón, aún más que las variaciones de cualquier otro elemento que lo conforme tomado individualmente.

3.2.2 AGREGADO FINO

Algunas propiedades físicas de los agregados, tales como forma, textura de la superficie de la partícula, porosidad, absorción, densidad, adherencia, resistencia, granulometría, además del tamaño máximo en el caso de agregado grueso, son importantes para darle características apropiadas al hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

En este caso particular de la tecnología del hormigón, como es la fabricación de H.A.R., es muy importante conocer la granulometría y la forma de la partícula del agregado fino.

La textura de la superficie y la forma de la partícula de la arena pueden influir en los requerimientos de agua de mezclado y en la resistencia a la compresión del

hormigón, debido a la distribución de las partículas y el contenido de vacíos que generan entre éstas. Las mismas consideraciones se tienen para el agregado grueso, ya que sus propiedades influyen en las características de adherencia entre el agregado, el mortero y los requisitos de agua de mezclado.

El incremento de volumen relativo de agregado grueso respecto al agregado fino en una mezcla, puede disminuir la cantidad de pasta por unidad de volumen de dicha mezcla. Por tanto, un hormigón de resistencia alta, como es este caso de aplicación, puede ser conseguido si se mantiene el volumen de agregado fino al mínimo posible, con tal que se logre una buena trabajabilidad y compactación del hormigón; Aunque la mayor resistencia implica que la cantidad de material cementante sea más alta, lo que obliga a aumentar la cantidad de finos. De aquí que será posible a partir de este criterio, conseguir hormigones de mayores resistencias para un contenido dado de material cementante.

Este criterio se basa en que si el material cementante de un hormigón de alta resistencia es alto, lo es también el contenido de arena.

Entendiendo por pasta a la “mezcla, plástica o endurecida, del material cementante hidráulico finamente dividido y agua” (NTE INEN 151, 2010, p. 4) que es el aglomerante fundamental de los agregados, el mortero, que a la vez es constituido también con arena, es usado también como aglomerante, con fines de aumentar la trabajabilidad y disminuir cemento empleado.

Respecto a las características del hormigón en estado fresco o plástico, se ven afectadas por dos características importantes de la arena: a) Módulo de Finura y b) Continuidad de tamaños.

Para hormigones de Alta Resistencia son preferibles los agregados finos con un módulo de finura (M.F.) en el rango de 2.5 a 3.2. Las mezclas realizadas con arenas cuyo M.F. está bajo 2.5 se muestran viscosas y darán como resultado una trabajabilidad pobre, por tanto un requerimiento de agua más alto.

Una posible alternativa para solucionar la deficiencia anterior es mezclar arenas de diferentes fuentes mejorando su granulometría y capacidad de producir resistencias más altas.

El uso de arenas manufacturadas puede generar una variación en la demanda de agua debido a la forma de sus partículas y al incremento de su área superficial.

3.2.3 AGREGADO GRUESO

La selección de agregados para la dosificación de hormigones de alta resistencia, tiene una consideración importante debido a que son elementos que ocupan el mayor volumen de la composición del hormigón e influyen de forma importante en la resistencia mecánica y otras propiedades del hormigón.

Los áridos gruesos pueden ser rodados o triturados; los rodados pueden generar mezclas más dóciles y trabajables con requerimientos de agua menores; por otro lado, los materiales triturados proporcionan mejor trabazón entre partículas, lo que otorga una mayor resistencia al hormigón.

En cuanto a adherencia, la textura superficial del agregado grueso es responsable de esta cualidad. La roca triturada presenta mayor adherencia respecto al canto rodado ya que sus texturas son rugosas y lisas, respectivamente.

Es recomendable, desde este punto de vista, el uso de agregados gruesos que tengan formas angulares y cúbicas con superficie rugosa.

Otra de las propiedades que indican que un hormigón está siendo bien diseñado, enfocándose en sus agregados gruesos, es la densidad, que además de ser un parámetro indicador de características como porosidad y permeabilidad, relacionadas directamente con los requerimientos de cemento para una resistencia determinada y con relación directa del factor económico, refiere que si se usa un material con buena densidad se obtendrá un hormigón mayor o

igualmente denso, lo que influye de forma directa sobre su peso volumétrico y la resistencia a compresión.

Éstas y las siguientes consideraciones especificadas en el ACI 211.4R, se deben tomar en cuenta al momento de diseñar un hormigón de H.A.R.

Debido a que el agregado grueso influye de forma importante en la resistencia del hormigón y en sus propiedades estructurales, además de afectar las características de adherencia entre el agregado y mortero y los requisitos de agua para mezclado, debe escogerse un agregado que sea lo suficientemente duro, libre de fisuras o planos débiles, limpio y libre de recubrimientos superficiales.

Puede definirse un tamaño óptimo apropiado para que produzca una resistencia máxima a compresión por cada kilogramo de cemento, los agregados entre 25 o 20 mm para producir resistencias de hasta 635 Kg/cm^2 y aquellos con tamaños de 12 o 9.5 mm para resistencias superiores a 635 Kg/cm^2 .

Es necesario indicar que se pueden conseguir altas resistencias, superiores a 700 Kg/cm^2 , con agregados de tamaño máximo nominal de 25 mm siempre y cuando la mezcla sea diseñada con aditivos.

Para la optimización del módulo de elasticidad, fluencia y contracción por secado es importante también, según indica el ACI 211.4R, el uso de agregados de mayor tamaño posible. Debido a que estos se incrementa a medida que se incrementan los tamaños de los materiales pétreos, según Cetin y Carrasquillo (1998, citado en Chan J., et. al., 2003).

3.2.4 ADITIVOS QUÍMICOS

En la fabricación de Hormigón de Alta Resistencia se busca básicamente disminuir la relación a/c, de modo que se reduzca la cantidad de agua y procurando que la cantidad de cemento no aumente, consiguiendo así

resistencias más altas, pero con franca disminución de la trabajabilidad ya que la consistencia lograda sería de una mezcla seca.

Este es el motivo de usar aditivos químicos, que puedan mejorar y controlar la velocidad de endurecimiento del H.A.R, evitar la pérdida de revenimiento y obtener una ganancia de resistencia acelerada, durabilidad y mejor trabajabilidad.

Los aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR), también conocidos como superfluidificantes, ayudan a dispersar las partículas de cemento y reducir los requerimientos de agua hasta en un 30%, logrando así resistencias a compresión más altas. Estos aditivos resultan más efectivos en mezclas ricas en cemento u otros materiales cementantes.

El primer cambio en las características físicas del hormigón en estado fresco que se presenta al añadir un aditivo, es la fluidez de la mezcla ya que varía la viscosidad de la pasta.

El aditivo químico actúa sobre las fuerzas de atracción existentes entre las partículas de cemento y los productos que resultan al hidratarlo, fuerzas que ocasionan la formación de grumos.

Al añadir un reductor de agua, se actúa en las partículas hidratadas de la mezcla, formando una capa alrededor del cemento aislándolo de otras partículas, es decir disminuyendo las fuerzas de atracción.

Los reductores de agua son elementos aniónicos y dan una carga negativa a las partículas de cemento, rechazándose entre sí.

Los Hormigones de Alta Resistencia pueden ser dosificados con varios aditivos, como, reductor de agua, retardante y un HRWR.

Estos aditivos pueden ser agregados al hormigón en porcentajes diferentes a los que recomiendan los fabricantes, existen diseños de H.A.R que han sido

realizados con dosificaciones altas de reductores de agua de fraguado normal y un acelerador de fraguado. Las proporciones correctas deberán ser definidas mediante la realización de pruebas de laboratorio, previas a la dosificación final.

3.2.5 AGUA DE MEZCLADO

Para la utilización de Agua en el diseño de Hormigones de Alta Resistencia, se acepta la condición de agua potable. Si es otra de diferente procedencia o agua de fuentes no potables, se recomienda verificarla mediante Normas ASTM C 94 ó INEN 1855.

3.3 OTROS COMPONENTES.

3.3.1 MATERIALES CEMENTANTES

Respecto a la fabricación de hormigones de alta resistencia se han definido ciertos materiales como ceniza volante, escoria de alto horno molida, humo de sílice (microsílice), de forma que se puedan aumentar las cantidades de material cementante y mantener así la relación agua/cemento baja ($a/(c+p)$).

Estos materiales pueden influir sobre ciertas propiedades del hormigón, como por ejemplo: pueden ayudar a controlar la elevación de la temperatura del concreto a edades tempranas y pueden reducir la demanda de agua para una trabajabilidad dada, pero también pueden reducir la ganancia de resistencia a edades tempranas.

3.3.2 FIBRAS VEGETALES

El tipo de fibras denominadas vegetales son aquellas derivadas de la clasificación de fibras naturales, que contienen además fibras de origen animal y/o mineral.

Investigaciones desarrolladas por varios autores, como Duff & SINCLAIR et. al. (Citados en GONZÁLES O., Generalidades sobre las fibras artificiales,

Universidad Nacional de Colombia, 2010), explican que las fibras vegetales pueden a su vez tener una amplia clasificación, como por ejemplo, blandas (de corteza o frutos de las plantas), duras (de hojas) u otras más extensas como fibras de hierbas y cañas, de hojas, de tallos, de semillas e hiladuras de frutos y fibras maderables.

El estudio de utilización de fibras en diferentes ámbitos, específicamente en el constructivo para este caso, ha ido desarrollándose paulatinamente y buscando mejorar las características de los materiales formando así otros nuevos denominados materiales compuestos.

El estudio de las fibras vegetales han llevado a evidenciar cierta desventaja debido a su descomposición o degradación en la matriz del material compuesto, lo que ha iniciado un nuevo campo investigativo que permita aumentar la durabilidad de las mismas.

3.3.3 FIBRAS ARTIFICIALES

Este tipo de fibras han sido creadas básicamente para la sustitución de las fibras naturales, ya que se puede prever su comportamiento y son de tamaño más uniforme y controlable.

Las fibras artificiales o aquellas más conocidas como: fibras plásticas, fibras metálicas o fibras de vidrio, se encargan de mejorar las propiedades mecánicas del Hormigón; siendo este un material frágil, las fibras le otorgan la capacidad de seguir resistiendo cargas en condición agrietada, es decir mejorando su tenacidad y en consecuencia permitiendo que soporte mayores esfuerzos de corte, flexión y tracción.

Varias de estas fibras cumplen un papel fundamental como fibras de refuerzo, siendo ésta la razón por la que son más utilizadas.

Dentro de este tipo se tienen el siguiente listado como ejemplos de fibras sintéticas que puede existir en el mercado, aclarando que en ellas no se enfocará

nuestra atención. Existen Fibras de Vidrio, de Aramida, de Boro, de Carbono, Grafitos, de Acero. Otras, como las fibras de poliacrilonitrilo, que aporta resistencias altas, tanto mecánica como químicas; las de Poliéster, Polipropileno y polivinilo que ofrecen resistencias mecánicas intermedias y químicas altas; y las de teflón que registran resistencias mecánicas nulas, pero altas resistencias químicas.

Las fibras de refuerzo junto con el hormigón conforman materiales compuestos, siendo distribuidas de forma direccionada o sin direccionar. Dependiendo de su orientación, pueden ser: anisotrópicas sin dirección privilegiada de comportamiento mecánico; isotrópico u orientado en una dirección; y, ortotrópicas o con orientación en dos direcciones más o menos perpendiculares. Estas fibras proveen al hormigón de resistencia a la tensión y rigidez, por lo que las mejoras en estas propiedades mecánicas dependerán de las propiedades físicas de las fibras y de la cantidad usada (Karihaloo & Lange-KORNBAK, 2005, citados González Octavio, 2010).

FIGURA 3.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS EN LA MEZCLA DE HORMIGÓN.



Fuente: Euclid Toxement S.A.

FIGURA 3.2 DISTRIBUCIÓN ALEATORIA DE LAS FIBRAS EN MEZCLADORA

Fuente: Euclid Toxement S.A

3.3.4 FIBRAS DE POLIPROPILENO

El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético, su fibra está hecha por procesos de extrusión a través de estiramiento en caliente del material por medio de un troquel.

Las fibras se fabrican por procesos de alambre estirado con sección transversal circular o por extrusión de películas plásticas con sección transversal rectangular. Aparecen como bultos de fibrilados o como monofilamentos; las fibras fibriladas son formadas por la expansión de una película plástica que está separada en tiras.

Por lo general, estas fibras plásticas presentan pobres características de adherencia con la matriz de cemento, tienen bajo punto de fusión, alta combustibilidad y un módulo de elasticidad relativamente bajo, no son corrosivas, son tenaces, presentan resistencia a los ataques de los álcalis, químico y clorhídrico, presentan baja conductividad térmica y prácticamente nula absorción de agua.

Por sus características, no afectan en la demanda de agua del hormigón fresco, no interviene en su hidratación y no influye en forma desfavorable sobre los

efectos de todos los constituyentes en la mezcla (González O., Generalidades sobre las Fibras Artificiales, U.N.C, 2010).

3.3.5 FIBRAS METÁLICAS

Las fibras de acero, usadas principalmente en hormigón al inicio del siglo XX, eran lisas y redondas; el alambre era cortado en pedazos según la conveniencia o requerimiento. Este tipo de fibras lisas y rectas han sido sustituidas por fibras metálicas con superficies ásperas, con extremos en gancho y rizadas u onduladas a lo largo de su longitud. Para facilitar su uso y el mezclado se unen formando manojos mediante goma soluble en agua (Wong, 2004, Katzer, 2006, IMCYC 2007 et. al. Citados en González O. 2010)

Estudios realizados respecto a esta fibra revelan que el torcido helicoidal maximiza la adherencia con el hormigón que lo rodea, esta fibra fue denominada Helix en 1998 y la investigación fue realizada en la Universidad de Michigan (NAAMAN, 1998, 1999, Citado en González O. 2010).

El principal inconveniente respecto del uso de esta fibra puede ser la corrosión. Al ser distribuidas de forma aleatoria en el hormigón y al tener cierto recubrimiento se podría solucionar este problema; cabe recalcar que cierta parte de las fibras no cumplirá con esta estipulación pudiendo presentarse algo de corrosión en la superficie del hormigón; sin embargo, puede considerarse un problema menor siempre y cuando se especifique que el recubrimiento en fibras metálicas debe ser mayor a 1 mm, manteniéndolas así seguras (Wong 2004, Citado en González O. 2010).

3.4 MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

3.4.1 CEMENTO

El cemento utilizado para la fabricación de hormigón de alta resistencia, no es necesariamente un cemento especial. En esta investigación ha sido utilizado el

cemento que es normalmente aplicado en dosificaciones para obras de hormigón convencional, lo que significa que el H.A.R dependerá básicamente de la relación a/c, de las características de los agregados y del uso o no de algún aditivo.

El cemento SELVALEGRE, que produce el grupo UNACEM, antes denominado LAFARGE, será el utilizado en este proyecto; se trata de un cemento Portland Puzolánico Tipo IP, diseñado, como ya se mencionó, para obras estructurales y construcciones de hormigón en general.

Este cemento cumple con las exigencias de la NTE INEN 490 y con la norma norteamericana ASTM C 595, además de contar con sello de calidad INEN.

Respecto a las exigencias de resistencias a la compresión, y acorde a la información de la hoja técnica del cemento, éste alcanza las resistencias requeridas con facilidad a todas las edades y continúa con un crecimiento progresivo aún después de los 28 días de edad, consiguiendo hasta un 20% más a los 90 días de edad.

Con este cemento puzolánico IP se han podido diseñar hormigones con resistencias en el rango de 45MPa (459 kg/cm²) y 50MPa (510kg/cm²); y además se ha evidenciado ser resistente a agentes agresivos, debido a su mayor compacidad que hace a los hormigones y morteros menos permeables impidiendo el acceso de aguas salinas, daños por suelos sulfatados, aguas agresiva, desechos industriales, aguas servidas, etc., como consecuencia de estas propiedades este cemento se caracteriza por ser durable.

El cemento usado como fuente tiene un amplio rango de aplicación en el diseño de hormigones para la construcción de:

- Edificios (Todos los elementos estructurales que lo conforman)
- Obras Viales (Puentes, Pavimentos)
- Muros, Represas.
- Obras Sanitarias e Hidráulicas

- Obras civiles en la industria Petrolera.
- Obras marítimas y Portuarias
- Morteros para diversas aplicaciones.

FIGURA 3.3 ALMACENAJE DEL CEMENTO SELVALEGRE



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

3.4.2 AGREGADO FINO

El agregado fino o arena seleccionada para este trabajo de investigación es aquella proveniente de San Antonio de Pichincha, específicamente en la mina Fucusucu, ubicada en el Cantón Quito, sector Mitad del Mundo.

Esta arena, denominada S.A. por las siglas de su origen, proviene de una mina de amplio uso en hormigones convencionales dentro de la ciudad de Quito, y ha sido tomada como válida por recomendaciones de estudio previos que se están usando como punto de partida (Guadalupe-Gallegos 2009, Tesis de Hormigón de Alta Resistencia). Por lo tanto se la considerará apta para su aplicación en Hormigón de Alta Resistencia con Fibra.

Las características de este agregado se comprobaron realizando ensayos regulados bajo Normas NTE INEN y ASTM, según se detalla a continuación:

ENSAYO	NORMA
• Granulometría	NTE INEN 696:2011

• Densidad y Absorción	ASTM C 136 - 06 NTE INEN 856:2010 ASTM C 131 - 06
• Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos	NTE INEN 858:2010 ASTM C 29 - 09
• Contenido de Materia Orgánica	NTE INEN 855:2010 ASTM C 40 - 04
• Contenido de Humedad	NTE INEN 862:2011 ASTM C 566 – 04

La realización de cada ensayo se detalla en el Capítulo 5, correspondiente a Ensayos de Laboratorio.

Es prudente mencionar que el ensayo de Granulometría presenta dos observaciones importantes:

1. La curva granulométrica de la Arena S.A. sale de los límites establecidos en la norma NTE INEN 872, apartado 5.2.1, Tabla 1 para requisitos de áridos. (Ver Gráfico 5.19)

El tramo que no se encuentra en el rango permisible está en la parte inferior de la curva y rebasa el límite superior, es decir, que la arena S.A. tiene mayor cantidad de finos que los permitidos; para este efecto la norma NTE INEN 872 indica, en el apartado 5.2.4, que el árido fino que no cumpla con los requisitos granulométricos y módulo de finura puede ser utilizado, siempre que mezclas de prueba con este árido, cumplan con los requisitos de las especificaciones particulares de la obra, razón por la cual se procedió a analizar al agregado para la aprobación de su uso, de modo que si el agregado no altera significativamente las características del hormigón en estado endurecido es apto para ser usado en su fabricación.

El ensayo de las probetas de hormigón, su dosificación y comportamiento mecánico, además de los análisis de los resultados se presentan en el

Capítulo 4. Dichos resultados obtenidos de la evaluación de los ensayos en las probetas fabricadas con las dosificaciones de prueba, usando arena natural y arena lavada, reflejan que no existe mayor afectación en el comportamiento mecánico de las probetas, por lo que la presencia de finos en exceso en la arena original se la mantiene.

2. El módulo de finura (M.F) de la arena, obtenido mediante la Serie de Duff Abrams, dio como resultado 2.3, valor menor al obtenido en el estudio previo de H.A.R que se está tomando como referencia, cuyos autores son los Ingenieros Guadalupe y Gallegos, quienes alcanzaron un módulo de 2.6.

El módulo de finura afectará, según advierte la norma, en el código del ACI211.4R, en la trabajabilidad de la mezcla ya que se tiene una arena más fina, esta situación puede ser controlada de dos formas: La primera, según recomendación del Ing. Luis Guadalupe, técnico de Holcim, es cambiar la relación piedra/arena, y la segunda implica el uso de un aditivo superfluidificante, según los ensayos previos realizados usando las dosificaciones recomendadas. En este caso resultó más conveniente el uso del aditivo superfluidificante.

El ensayo para granulometría, tanto en arena como en ripio, se realizó con los materiales en estado natural y lavado, para poder apreciar la variación que se pueda dar por la presencia de finos.

Con el lavado, la Arena S.A. alcanza un módulo de finura de 2.7 que se aproxima al que tenía la arena en el año 2009 del estudio previo. Esta operación previa podría ser entendida como un proceso opcional para el posible uso de la arena S.A. lavada en la fabricación de hormigón, ya que los ensayos demostraron no tener influencia en la resistencia final.

Es importante aclarar que un diseño con arena y agregado grueso lavados daría como resultado un hormigón ideal, en el que se observaría únicamente el

comportamiento de las fibras, lo que no es real ni práctico, además de encarecer el producto. Por esta razón se optó por usar los agregados en estado natural, de forma que la investigación pueda dar resultados ajustados a las condiciones reales de los agregados.

FIGURA 3.4 MUESTREO DEL AGREGADO FINO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

3.4.3 AGREGADO GRUESO

El agregado grueso designado como el más adecuado para las mezclas de H.A.R en la investigación de los ingenieros Guadalupe-Gallegos es el proveniente de la mina de Holcim-Pifo, ubicada en la Parroquia rural de Pifo, cantón Quito, Provincia de Pichincha.

La piedra #7 cuyo tamaño máximo, que corresponde al tamaño del menor tamiz por el que pasa el 100% del agregado, es de $\frac{3}{4}$ de pulgada, siendo su tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ pulgada, que es el menor tamaño de la malla o tamiz por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, es decir que esta malla puede retener del 5% al 15% del agregado dependiendo de su tamaño.

Estos valores fueron corroborados en el ensayo granulométrico realizado en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional. Todos los ensayos referentes a las propiedades de los agregados, tanto fino como grueso, se muestran en el Capítulo 5.

Cabe indicar que el ensayo granulométrico, realizado con material lavado y sin lavar, presenta similares resultados, siendo el módulo de finura del árido grueso en los dos casos, de 5.92; la gradación que fue seleccionada corresponde a la de $\frac{3}{4}$ de pulgada y se evidencia que la curva granulométrica se aparta totalmente de los límites de gradación que establece la norma NTE INEN 872. La norma en mención, a su vez señala, en el apartado 6.3.3, que los áridos gruesos que presenten resultados de ensayos que excedan los límites que se especifican en la Tabla 4 de la misma norma, pueden aceptarse, siempre que el hormigón fabricado con un árido de estas características provea propiedades satisfactorias, en especímenes elaborados de mezclas de prueba ensayadas en el laboratorio.

Por estas condiciones, tanto con el agregado grueso como con el agregado fino, se diseñaron mezclas de prueba en las que se analizaron sus propiedades en estado fresco (Cono de Abrams) y endurecido (Ensayo a Compresión). Por no tener comportamientos diferentes a los esperados, se optó por usar el agregado grueso en la condición de suministro.

Los ensayos de los especímenes elaborados con las dosificaciones de prueba se muestran en el Capítulo 4, mientras que los ensayos de los especímenes fabricados con las mezclas definitivas se muestran en el Capítulo 6, al igual que el análisis de los mismos.

FIGURA 3.5 MUESTREO DEL AGREGADO GRUESO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

3.4.4 ADITIVOS QUÍMICOS

El empleo de aditivos tales como: reductor de agua de alto rango (HRWR), fluidificante, acelerante y/o retardante de fraguado, son necesarios en el diseño de estas mezclas ya que, como se explicó anteriormente, se generan hormigones con relaciones a/c muy bajas, es decir hormigones secos, de trabajabilidad pobre y otras condiciones adversas que son mejoradas con los aditivos químicos.

En este proyecto se usó un aditivo de fabricación colombiana, que lo distribuye la empresa TOXEMENT EUCLID CHEMICAL, y que obedece a las siguientes especificaciones:

Nombre comercial: EUCON 37, que es un reductor de agua de alto poder o un HRWR como indica el ACI 211.4R, cumple con la norma ASTM C 494, tipos A y F, e ICONTEC 1299.

De acuerdo con la información técnica suministrada por el fabricante, este aditivo se recomienda especialmente para:

- Hormigón de Alto Desempeño
- Hormigón Premezclado en general.
- Hormigón Fuertemente reforzado.
- Hormigón para losas y concreto masivo.
- Hormigón con relación a/c baja.
- Hormigón Superfluido.

El aditivo trabaja con una doble acción, dependiendo de su dosis:

- a.- Como aditivo superplastificante o fluidificante, con dosis entre 0.5% al 1% del peso del cemento usado en la mezcla, y
- b.- Como reductor de agua, para producir hormigones de alta resistencia, con dosis entre 0.9% al 1.5% del peso del cemento usado en la mezcla.

La cantidad óptima de aditivo a ser usada dentro del diseño del hormigón, debe ser determinada mediante la realización de pruebas previas.

Algunas de las ventajas que aporta este aditivo al hormigón son:

- Reducción de permeabilidad en el hormigón endurecido.
- Aumento de la resistencia a la acción de aguas agresivas.
- Aumento de resistencias mecánicas a edades tempranas.
- Disminución de retracciones por fraguado.
- Elimina la segregación de los agregados del hormigón.
- Disminuye la exudación.

Para determinar el porcentaje adecuado de EUCON 37, se realizaron pruebas de asentamiento en hormigón fresco y determinación de sus resistencias a compresión a edades de 3, 7 y 14 días, empleándose porcentajes de 0.5% a 1% como fluidificante, y de 1% a 1.5% como reductor de agua, con lo que se logró hacer una comparación apropiada para definir la cantidad óptima.

FIGURA 3.6 MUESTRA EUCON 37



Fuente: Euclid Toxement S.A

Con el objetivo de evaluar el aditivo y descartarlo como la posible variable que afecte la resistencia a la compresión, se realizaron mezclas adicionales, utilizando otro aditivo reductor de agua de alto rango, el cuál será denominado “Reductor 2” en las tablas posteriores que contiene el capítulo 6.

3.4.5 FIBRA DE POLIPROPILENO/POLIETILENO

En este proyecto, se limitó la variable del tipo de fibras, centrándose el estudio al uso de las denominadas fibras sintéticas estructurales; con esta consideración se eligieron las fibras producidas por TOXEMENT EUCLID CHEMICAL, que se comercializan como Fibras Tuf – Strand SF.

Son fibras sintéticas obtenidas de una mezcla de polipropileno/polietileno, con estructura de monofilamento, las cuales se auto fibrilan cuando se ponen en contacto con el agua de la mezcla de hormigón, mejorando así su adherencia a la matriz cementicia.

FIGURA 3.7 FIBRAS DE POLIPROPILENO/POLIETILENO TUF-STRAND, DESFRIBILADAS.



Fuente: Euclid Toxement S.A

Según la ficha técnica provista por el fabricante, estas fibras se usan exitosamente para el reemplazo de malla electrosoldada y fibras metálicas en una amplia variedad de aplicaciones.

Además se indica que las fibras Tuf – Strand SF cumplen con la norma ASTM C 1116, para tipo III (Syntetic Fiber – Reinforced Concrete or Shotcrete) y están diseñadas específicamente para proporcionar una resistencia a la tensión equivalente a la de los refuerzos convencionales, característica que se acepta sin comprobación.

Según la información técnica proporcionada por Toxement, posee una resistencia a la tensión de 600 a 650 MPa (6118 a 6628 Kg/cm²) y módulo de elasticidad 9.5 GPa (96870 Kg/cm²), e indica que las aplicaciones en las que se han usado con éxito estas fibras son:

- Elementos prefabricados en Hormigón.
- Hormigón lanzado (recubrimiento de túneles, construcción de piscinas, estabilización de túneles)
- Pavimentos y Whitetopping (Reforzamiento de pavimentos flexibles).
- Pisos de Hormigón en centros de distribución, pisos industriales, pisos de bodegas.

Algunos de los beneficios que se declara con el uso de estas fibras son:

- Control y mitigación del cambio volumétrico y fisuración por retracción plástica, reduce la segregación y la exudación.
- Reducción del deterioro por desgaste de equipos, que circulen sobre este hormigón.
- Resistente a la corrosión, no es magnética, no es un refuerzo estructural conductible.

Respecto a su dosificación o cantidad de uso, esta fibra puede ser adicionada a la mezcla de concreto en un rango de 1.8 -12.0 kg/m³. Siendo éste el punto medular del estudio: buscar la cantidad óptima en la cual se presenten los valores más altos de las propiedades mecánicas del hormigón.

Como parte del estudio se realizó un análisis comparativo de cuatro (4) cantidades que varían de acuerdo al rango establecido por el fabricante, y son 2, 5, 8 y 12 kg/m³.

FIGURA 3.8 FIBRAS DE POLIPROPILENO/POLIETILENO TUF-STRAND.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

CAPÍTULO 4

DOSIFICACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de hormigones de alta resistencia exige una selección previa de agregados, cemento y una fuente de agua adecuados, es por tal razón que se somete a los materiales seleccionados a ensayos normalizados de laboratorio, con el fin de determinar ciertas propiedades que servirán como datos para realizar la dosificación de mezclas, con las que se pretende alcanzar un determinado esfuerzo a compresión simple, el cual generalmente se toma como un requisito y objetivo del diseño de un hormigón.

En términos generales, los hormigones de alta resistencia son difíciles de lograr, son poco trabajables ya que la dosis de agua es baja, por lo que normalmente se obliga el empleo de aditivos para dotarle de propiedades que normalmente no tiene, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Las proporciones a mezclarse deben ser seleccionadas de forma que se obtenga un hormigón resistente, durable y principalmente económico. En vista de que los agregados son parte primordial del hormigón, son ensayados en el laboratorio con el fin de determinar si son o no aptos para ser utilizados en H.A.R, al comparar sus características con las recomendaciones técnicas de organismos reconocidos y especificaciones de uso.

Los principales ensayos realizados fueron:

EN AGREGADOS: Tanto para agregado grueso como para agregado fino:

- Granulometría
- Densidad Real en estado saturado con la superficie seca (D_{ss}).
- Absorción.
- Peso unitario compactado y suelto (Densidades Aparentes).

FIGURA 4.1 AGREGADO FINO DE LA MINA DE SAN ANTONIO



Elaborado por: Fanny G., Julia P

FIGURA 4.2 AGREGADO GRUESO DE LA MINA DE PIFO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

EN CEMENTO

- Densidad Real.
- Densidad Aparente Suelta y Compactada.
- Consistencia Normal.
- Tiempos de Fraguado.

FIGURA 4.3 CEMENTO SELVALEGRE.

Fuente: <http://www.diacelec.com.ec/wp-content/uploads/2014/07/SELVALEGRE-1.png>

Adicionalmente, es aconsejable conocer el contenido de humedad natural de los agregados, especialmente en obra, ya que de esta dependerá la variación o no de la cantidad de agua para la mezcla, sin que se vea afectada la relación a/c . Sin embargo para fines de este estudio las dosificaciones fueron preparadas con los materiales completamente secos.

4.2 RECOPIACIÓN DE NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA DISEÑO DE MEZCLAS DE H.A.R.

4.2.1 REQUISITOS DE DESEMPEÑO DEL H.A.R.

El ACI 211.1 presenta el método recomendado para dosificación de hormigón de resistencia normal en un rango de 140 a 420 Kg/cm². Dado que las dosificaciones de hormigón de alta resistencia son más críticas, se emplean puzolanas y otros materiales cementantes, lo que exige la aplicación de una nueva relación agua/material cementante ($a/(c+p)$), en ésta el material cementante será el cemento más las adiciones de cenizas o puzolanas. Para la dosificación del H.A.R. se empleó el método descrito en el documento ACI 211.4R.

Generalmente, se deben realizar varias mezclas de prueba a fin de conseguir las proporciones óptimas, ya que existen múltiples variables en juego que podrían llevar a que la resistencia del hormigón varíe en rangos muy amplios.

4.2.1.1. Edad de Prueba

Las proporciones de los componentes de la mezcla pueden variar, dependiendo de la edad que se considere como límite especificado para la obtención de resistencia a compresión de diseño. Normalmente se maneja el criterio de 28 días para alcanzar la resistencia de diseño o resistencia especificada.

Cuando se trata de hormigones de alta resistencia este criterio cambia, debido a que este tipo de hormigones tiende a ganar resistencia después de los 28 días y se consideran edades de 56, 91 días y mayores, pudiendo la edad especificada incluso llegar a ser de un año. Considerando la variación notable de estas edades, se establecen cambios también en las tablas para dosificación, las que se detallarán a continuación, y en las cuales varían las proporciones del material cementante de acuerdo a este parámetro, siendo ajustadas para producir la resistencia deseada a las nuevas edades especificadas. En este caso de estudio se consideró la edad convencional de 28 días como tiempo necesario para alcanzar la resistencia especificada.

FIGURA 4.4 ESPECÍMENES FABRICADOS PARA SER ENSAYADOS A DIFERENTES EDADES.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

4.2.1.2. Resistencia Requerida.

Se pueden realizar mezclas de prueba con base a experiencias en campo o en laboratorio según permite el ACI 318. Pero es indispensable alcanzar los requisitos de resistencia especificados, por lo que las proporciones de los componentes, sean estos agregados y/o materiales cementantes, deben ser definidas de tal manera que el resultado promedio de las pruebas de compresión excedan a la resistencia a compresión especificada, f'_c , en una cantidad lo suficientemente alta, como para que la probabilidad de alguna baja resistencia en las pruebas de compresión sea menor.

El comité 211.4R del ACI recomienda que si se van a realizar dosificaciones basadas en la experiencia de campo, la resistencia promedio requerida, usada como pauta para la selección de las proporciones, sea el mayor valor de las ecuaciones consideradas a continuación:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34s \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$f'_{cr} = 0.9 f'_c + 2.33s \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde:

f'_{cr} = Resistencia promedio requerida, Kg/cm².

f'_c = Resistencia especificada a los 28 días, Kg/cm².

s = Desviación Estándar

Cuando la dosificación de Hormigón de Alta Resistencia, se realiza en base a mezclas de prueba en laboratorio, la resistencia requerida promedio se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + 100}{0.9} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Dónde,

f'_{cr} = Resistencia promedio requerida, Kg/cm².

f'_c = Resistencia especificada a los 28 días, Kg/cm².

Esta ecuación presenta un valor más alto que el valor de resistencia requerida promedio presentado en la Tabla 4.1 de este capítulo, correspondiente a la tabla 5.3.2.2 del ACI 318, con motivo de que los valores de resistencia obtenidos bajo condiciones ideales de campo alcanzan únicamente el 90% de la resistencia alcanzada en laboratorio.

No es posible lograr que el valor promedio de resistencia conseguido en campo sea igual que el valor conseguido en una mezcla en laboratorio, ya que son varios los factores que pueden incidir en la variación de resistencia y su medición en campo, por lo que las proporciones de la mezcla pueden obligar a un ajuste adicional para alcanzar la resistencia buscada.

TABLA 4.1 RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA

RESISTENCIA ESPECÍFICADA A LA COMPRESIÓN (MPa)	RESISTENCIA PROMEDIO REQUERIDA A LA COMPRESIÓN (MPa)
$f'_c < 20$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$20 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5.0$

Fuente: ACI 318 (2005)

Además de la resistencia a compresión, otras propiedades del hormigón pueden determinar la selección de materiales y sus proporciones, como por ejemplo:

- Módulo de Elasticidad.
- Resistencia a Flexión y a Tensión.
- Calor de Hidratación, Fluencia y Contracción por Secado.

- Durabilidad y Permeabilidad.
- Tiempo de Fraguado.
- Método de Colocación en obra.
- Trabajabilidad.

4.2.2 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN A/C PARA INCREMENTO DE RESISTENCIA.

Con base en varias investigaciones se ha determinado que la variable más importante para conseguir un hormigón de alta resistencia es la relación a/c. En varios hormigones, para lograr mayores resistencias, se han añadido a la mezcla cenizas volantes, escoria de alto horno, puzolana y demás materiales cementantes, lo que genera un cambio de la tradicional relación a/c por la relación $a/(c+p)$, donde el término “p” añadido al denominador, simboliza al material cementante adicional incorporado a la mezcla, esta relación al igual que la relación tradicional puede ser calculada a partir del peso del agua y el cemento más otros materiales aglomerantes.

La masa de agua en aditivos reductores de agua de alto rango o por sus siglas en inglés HRWR, debe ser incluida en la $a/(c+p)$.

Es importante considerar además que varios factores pueden alterar esta relación, tales como las condiciones ambientales, estado del equipo que se usa para las mezclas; además, la selección de la cantidad de agua necesaria para la mezcla partiendo con un revenimiento dado, dependerá de condiciones como: tamaño y forma de las partículas del agregado y porosidad de las mismas, contaminación, granulometría del agregado, cantidad de cemento, el tipo de aditivo reductor de agua, entre otras.

Es necesario para las dosificaciones conocer previamente el contenido de humedad de los agregados, dado que se debe realizar la corrección por cantidad de agua que requerirá la grava y la arena por su absorción, es decir para saturarlos, y el agua que se necesitará para la fabricación del hormigón

propiamente; en vista que la relación a/c es primordial, una ligera variación podría generar alteraciones grandes en la resistencia a compresión esperada.

La relación existente entre a/c y la resistencia a compresión que se ha evidenciado para hormigones convencionales, es también válida para hormigones de alta resistencia, pero es importante que al trabajar con relaciones a/c bajas, se debe incluir en la mezcla aditivos HRWR, además de considerar otros materiales cementantes y la selección de agregados adecuados para este tipo de hormigones.

El rango de relaciones agua/cemento con las que se dosifican hormigones de alta resistencia está entre 0.20 hasta 0.50, considerando que son hormigones muy poco trabajables y bastante secos, se debe prever que las partículas de cemento posiblemente no se hidratarán completamente, por lo que es de mucha importancia conocer las propiedades del cemento, como su consistencia normal y tiempos de fraguado, ya que será imprescindible usar una combinación de aditivos, como un retardante de fraguado, especialmente para cuando se prevén trayectos largos de entrega del hormigón, o un tiempo prolongado para su colocación dentro de algún elemento estructural.

4.2.3 PROPORCIONES Y PORCENTAJES DE DOSIFICACIÓN.

El ACI 211.4R presenta una guía para dosificar hormigones de alta resistencia, la cual se revisará, paso a paso, a continuación. Esta guía emplea tablas con doble entrada, en las que las primeras variables son resistencia requerida y la edad a la que se busca conseguir dicha resistencia, además tablas que incorporan si la mezcla se diseñará o no con aditivo reductor de agua, con el objetivo de buscar las proporciones adecuadas mediante mezclas de prueba. (Ver tablas 4.6 y 4.7).

El proceso a seguir se detalla a continuación, en el apartado 4.2.4, a fin de dar a conocer el método utilizado en esta investigación.

4.2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS H.A.R.

Los siguientes pasos representan una guía para obtener la dosificación óptima que se usará en las mezclas consideradas definitivas, sin embargo es importante aclarar que dichas proporciones dependerán de los agregados, tipo de cemento y aditivo que se utilice en la mezcla.

Paso 1: *Selección del Revenimiento y de la Resistencia del concreto requeridos.*

La Tabla 4.2, que corresponde a la tabla 4.3.1 del ACI 211.4R, presenta valores para la selección del revenimiento, con o sin uso del HRWR; aunque se puede lograr resistencias altas aún sin tener un revenimiento inicial medible, se recomienda un asentamiento o revenimiento inicial de 25 a 50 mm previo al uso del HRWR.

El revenimiento en este rango permitirá tener una cantidad de agua suficiente para el mezclado y la actuación eficiente del aditivo superfluidificante en dicha mezcla.

TABLA 4.2 REVENIMIENTO RECOMENDADO PARA CONCRETOS CON Y SIN HRWR

Concreto hecho usando HRWR*		
Revenimiento antes de añadir HRWR	25 a 50	mm
Concreto hecho sin HRWR		
Revenimiento	50 a 100	mm

Fuente: ACI 211.4R (1998) – IMCYC (2005)

Los hormigones con valores de revenimiento menores a 50 mm son difíciles de compactar debido al alto contenido de agregado grueso y materiales cementantes.

Para hormigones de alta resistencias dosificados sin HRWR se puede utilizar revenimientos entre 50 y 100 mm, dependiendo de la aplicación que vaya a tener ese hormigón.

En este punto es preciso determinar la Resistencia a Compresión Requerida, para establecerla se debe proceder de la manera expuesta en el inciso 4.2.1.2 de este capítulo, que corresponde al capítulo segundo del ACI 211.4R.

Paso 2: Selección del tamaño máximo del agregado.

El ACI 318-05 recomienda en su sección 3.3.2 que el tamaño máximo nominal del agregado grueso debe cumplir con las tres condiciones siguientes:

- a) No debe ser mayor a la quinta parte de la dimensión más corta entre los lados del encofrado.
- b) No debe ser mayor que la tercera parte del peralte de la losa.
- c) Ni debe ser superior a los tres cuartos del espaciamiento mínimo libre entre el acero de refuerzo individuales, paquetes de varillas, tendones individuales, paquetes de tendones o ductos.

Condiciones que pueden ser desestimadas, si el ingeniero o técnico encargado considera que la trabajabilidad y los métodos de compactación sean tales que el hormigón pueda ser colocado sin dejar vacíos o porosidades en el elemento estructural.

TABLA 4.3 TAMAÑO MÁXIMO SUGERIDO PARA EL AGREGADO GRUESO

Resistencia requerida del concreto kg/cm ²	Tamaño máximo sugerido para agregado grueso mm
$f'_{cr} < 650$	20 a 25
$f'_{cr} > 650$	9.5 a 12.5*

Fuente: ACI 211.4R (1998)

* Se puede conseguir resistencias entre 650 y 850 Kg/cm² usando agregados de tamaño máximo superiores a los recomendados en la tabla, pero no mayores a 25 mm.

Paso 3: Selección del Contenido Óptimo de Agregado Grueso.

La cantidad óptima de la grava dependerá de su resistencia potencial y de su tamaño máximo nominal. El contenido óptimo para la mezcla se expresa como fracción de su masa volumétrica compacta en estado seco (MVsc), también conocida como Densidad Aparente o Masa Unitaria Compactada, y se muestra en la Tabla 4.4 como función del tamaño máximo nominal.

TABLA 4.4 RECOMENDADO DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE HORMIGÓN (m³/m³)

Contenidos óptimos de agregado grueso para tamaños máximos nominales de agregados que han de ser usados con arena de un módulo de finura entre 2,5 a 3,2					
Tamaño máximo nominal, mm	9.5	12.5	19.05	20	25
Volumen fraccionario* de agregado grueso varillado y secado al horno	0.65	0.68	0.715	0.72	0.75

Fuente: ACI 211.4R (1998)

* Los volúmenes están basados en agregados en condiciones de varillado y secado al horno tal como se describe en ASTM C 29 para la masa unitaria de los agregados.

Después de seleccionar el contenido óptimo de agregado grueso, se calcula su peso secado al horno (OD) por metro cúbico de concreto, con ayuda de la ecuación 4.4.

Peso del agregado grueso secado al horno:

$$(O.D.) = (VF_{A.G} * MV_{SC}) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Dónde:

$VF_{A.G}$ = Volumen Fraccionario para Agregado Grueso, obtenido de la Tabla 4.4.

MV_{sc} = Masa Unitaria Compactada del Agregado Grueso.

Los valores dados en la Tabla 4.4 se recomiendan para usarse conjuntamente con arenas de módulo de finura 2.5 a 3.2, ya que en hormigones de alta resistencia, por su alto contenido de material cementante, la lubricación y la mejor compactación del hormigón no depende solamente del agregado fino; en las dosificaciones de hormigón convencional las cantidades óptimas de grava dependen del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino.

Paso 4: *Estimación del Agua de Mezclado y del contenido de Aire.*

La cantidad de agua requerida por volumen unitario de concreto para un determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y de la granulometría de los agregados, de la cantidad de cemento y el tipo de aditivo reductor de agua que se prevea usar.

Cuando se usa un HRWR, su contenido de agua debe ser considerado como una parte de $a/(c+p)$.

La Tabla 4.5 proporciona las cantidades de agua para hormigones de alta resistencia que usen agregados de tamaños máximos entre 9.5 a 25 mm, previamente a la adición de aditivos; además de los valores correspondientes para contenido de aire atrapado esperado.

Las cantidades mostradas son máximas, y consideradas para agregados gruesos limpios, angulares y bien graduados, como recomiendan las normas ASTM C33 y NTE INEN 872:2011.

Las variaciones en estas cantidades de agua pueden darse por la forma y textura superficial de las partículas del agregado fino, lo que se considera al evaluar su contenido de vacíos.

Esta tabla es aplicable para agregados finos con contenido de vacíos del 35%, este parámetro se calcula mediante la Ecuación 4.5.

$$\text{Contenido de Vacíos (V\%)} = \left(1 - \frac{\text{Masa Compactada}}{D_{SSS}}\right) * 100 \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Dónde,

Masa Compactada = Masa Unitaria Compactada del Agregado Fino

D_{SSS} = Masa Especifica del Agregado Fino en estado de superficie saturada seca.

TABLA 4.5 PRIMERA ESTIMACIÓN DEL REQUISITO DEL AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO FRESCO CON BASE EN EL USO DE UNA ARENA CON 35% DEVACÍOS.

Revenimiento, mm	Agua para mezclado, kg/m ³				
	Tamaño máximo del agregado grueso, mm				
	9.5	12.5	19.05	20	25
25 a 50	185	175	170.63	170	165
50 a 75	190	185	176.27	175	170
75 a 100	195	190	181.27	180	180
Contenido del aire atrapado*	3	2.5	2.06	2	1.5
	(2.50) t	(2.00) t	(1.56) t	(1.50) t	(1.00) t

(t): Mezclas realizadas con HRWR

Fuente: ACI 211.4R (1998)

Cuando la arena usada tiene un contenido de vacíos diferente al 35% debe realizarse una corrección mediante la Ecuación 4.6.

$$\text{Ajuste del agua de mezclado} = (V\% - 35) \times 5 \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Dónde:

V% = Contenido de Vacíos

Ajuste del agua de mezclado = kg/m³

Esta ecuación realiza una corrección de agua de 5 Kg/m³ de concreto, por cada uno por ciento de la desviación en el contenido de vacíos, respecto al 35 %.

Paso 5: Selección de la relación a/(c+p).

Se considera esta relación, ya que para la dosificación de hormigones de alta resistencia se pueden usar otros materiales cementantes, tales como cenizas volantes, escoria de alto horno, etc., como adiciones a la cantidad de cemento usada.

Las Tablas 4.6 y 4.7 proporcionan relaciones $a/(c+p)$ en función del tamaño máximo del agregado grueso, para ciertas resistencias de diseño logradas a edades de 28 y 56 días.

La primera tabla se aplica a hormigones dosificados sin HRWR, y la segunda cuando se emplee este tipo de aditivos. De la observación de estas tablas se puede concluir que el uso de un aditivo HRWR redundará en alcanzar una mayor resistencia en un período menor de tiempo, es decir un endurecimiento a edades más tempranas.

TABLA 4.6 RELACIÓN $W/(C+P)$ MÁXIMA RECOMENDADA PARA CONCRETOS ELABORADOS SIN HRWR

Resistencia de campo f'_{cr} *, kg/cm^2		a/c			
		Tamaño máximo del agregado grueso, mm			
		9.5	13	20	25
490	28 días	0.42	0.41	0.40	0.39
	56 días	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28 días	0.35	0.34	0.33	0.32
	56 días	0.38	0.37	0.36	0.35
635	28 días	0.30	0.29	0.29	0.28
	56 días	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28 días	0.26	0.26	0.25	0.25
	56 días	0.29	0.29	0.27	0.26

Fuente: ACI 211.4R (1998)

TABLA 4.7 RELACIÓN W/(C+P) MÁXIMA RECOMENDADA PARA CONCRETOS ELABORADOS CON HRWR.

Resistencia de campo f'_{cr^*} , kg/cm ²		a/c Tamaño máximo del agregado grueso, mm			
		9.5	13	20	25
490	28 días	0.50	0.48	0.45	0.43
	56 días	0.55	0.58	0.48	0.46
560	28 días	0.44	0.42	0.40	0.38
	56 días	0.48	0.45	0.42	0.40
635	28 días	0.38	0.36	0.35	0.34
	56 días	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28 días	0.33	0.32	0.31	0.30
	56 días	0.37	0.35	0.33	0.32
775	28 días	0.30	0.29	0.27	0.27
	56 días	0.33	0.31	0.29	0.29
845	28 días	0.27	0.26	0.25	0.25
	56 días	0.30	0.28	0.27	0.26

Fuente: ACI 211.4R (1998)

Paso 6: *Cálculo de contenido de material cementante.*

Se puede calcular la cantidad de material cementante mediante la relación entre la cantidad de agua determinada en el *paso 4* y la relación agua-material cementante determinada en el *paso 5*.

$$C = \frac{W_{agua}}{\frac{a}{c+p}} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Dónde,

C = Masa del material cementante, kg.

W_{agua} = Cantidad de agua del mezclado para, m³

$\frac{a}{c+p}$ = Relación agua-material cementante, kg/cm³

Paso 7: *Proporción de la mezcla básica, sin ningún otro material cementante.*

Para obtener las mezclas óptimas de cemento más puzolanas, se deben realizar varias mezclas de prueba con cemento portland como único material cementante, y luego, a partir de estas mezclas, añadir otros materiales como ceniza volante,

humo de sílice o escoria molida de alto horno y demás, si fuera necesario, hasta determinar la cantidad que mejora el comportamiento del hormigón.

Si se usa el cemento portland como único material cementante, las proporciones básicas deben conseguirse de la siguiente manera.

1. Contenido de Cemento:

Este peso debe ser calculado como indica el paso 6.

2. Contenido de Arena:

Después de determinar los pesos de agregado grueso, material cementante, agua y el contenido de aire para un metro cúbico de H.A.R., se puede calcular el contenido de arena para completar la unidad volumétrica, usando el método de volúmenes absolutos, es decir para completar el 100% del volumen total.

$$\text{Vol. Arena} = 1\text{m}^3 - \text{Vol. A. Grueso} - \text{Vol. Cemento} - \text{Vol. Agua} - \text{Vol. Aire} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Estos volúmenes corresponden a grava y arena en condición de superficie saturada seca, por lo que se deben realizar las correcciones que correspondan, en caso de que los agregados estén muy húmedos o muy secos. Para evitar la variación de la relación a/c por efecto de la humedad del agregado, se ve conveniente y práctico trabajar con el material seco, es decir, que previamente a la realización de las mezclas definitivas se debió secar los materiales al horno, a una temperatura de 110°C por un período no mayor a 24 horas, evitándose así las correcciones por variación del contenido de humedad en agregados.

El volumen de los componentes se convertirá en pesos necesarios para las mezclas por medio de conocer sus densidades.

4.2.5 EJEMPLO DEMOSTRATIVO PARA DOSIFICACIONES DE H.A.R

El siguiente ejemplo, tiene como objetivo, la demostración del uso de la hoja de cálculo diseñada para este proyecto.

Se presenta el cálculo para un hormigón de 500 Kg/cm² de resistencia a la compresión.

FECHA: 30-jun-14

RESISTENCIA: kg/cm²

MATERIALES

DATOS DE AGREGADO FINO DISPONIBLE

	Descripción	MF	Masa Compactada	DSSS	Absorción (%)	Contenido de agua (%)
Arena	Arena S.A.	2,3	1722,8	2552,5	4,54	0
Cemento	SELVALEGRE	-	-	3000	-	-

PASO 1: Selección de asentamiento y resistencia requeridos del hormigón.

Uso de reductor de agua?	SI
Asentamiento deseado:	5* cm

f_{cr}': 666,67 kg/cm²
Asentamiento teórico: 2,5 a 5 cm

*Ver revenimiento recomendado para concretos con y sin HRWR en la Tabla 4.2

PASO 2: Selección del tamaño máximo del agregado.

DATOS DE AGREGADO GRUESO DISPONIBLE

	Descripción	TM(pulg)	Masa Compactada	DSSS	Absorción (%)	Contenido de agua (%)
Piedra	# 7 Pifo	¾	1485,9	2583,3	2,52	0

*Ver tamaño máximo sugerido para el agregado grueso en la Tabla 4.3

PASO 3: Selección del contenido óptimo de agregado grueso.

Volumen fraccionario de agregado grueso: 0,68*
Cantidad de agregado grueso: 1010,41 kg/m³

*Ver en la Tabla 4.4

PASO 4: Estimación del agua de mezclado y contenido de aire

Cantidad de agua inicial: 170,63 kg/m³
Contenido de aire atrapado: 1,56 %
Contenido de vacíos: 32,51 %
Cantidad de agua corregida: 158,16 kg/m³

El contenido de aire atrapa se elige según el tamaño máximo de la Tabla 4.5

PASO 5: Selección de la relación a/c

$$f'_{cr*} = f'_c + 100$$

fcr:** 600,0 kg/cm²

Relación agua-material cementante:

VALORES*	fcr**	a/c
1	560	0,40
2	635	0,35
Interpolación	600	0,38

* La relación a/c de se escoge de la Tabla 4.7 de acuerdo a el tamaño máximo del agregado y fcr** de diseño.

PASO 6: Cálculo del contenido del material cementante.

Cantidad de agua corregida: 158,16 kg/cm³

Relación agua-material cementante:

fcr**	a/c
600,0	0,38

Cantidad de material cementante: 421,55 kg/cm³

PASO 7: Proporción de la mezcla básica sin ningún otro material cementante

Cantidad de arena:

Material	Peso (kg)	Vol. (m ³)
Agua	158,16	0,158
Cemento	421,55	0,141
Piedra	1010,41	0,391
Aire	0,00	0,016
Total		0,705

Cantidad de arena:	751,86	kg/m ³
--------------------	--------	-------------------

Cantidades de materiales para elaborar 1 m³ de H.A.R:

f'c: **500** kg/m²
Volumen: **1000,00** litros

Material	Peso SSS	Peso EN	P. Ensayo	
Agua	158,16	217,76	217,75	Kg
Cemento	421,55	421,55	421,54	Kg
Piedra	1010,41	984,95	984,94	Kg
Arena	751,86	717,73	717,72	Kg
Aditivo (1.5%)			6,32	Kg
Total		2341,98		

a/c:	0,38
%piedra:	0,58
%arena:	0,42

4.2.6 MEZCLAS DE PRUEBA.

En el presente proyecto de investigación se procedió a realizar varias mezclas de prueba, con el fin de analizar en ellas, el asentamiento, la trabajabilidad, el tiempo de fraguado y segregación, entre otros aspectos que pudiesen ser determinantes

en la resistencia final obtenida; apreciándose cualitativamente si este tipo de hormigones son o no de fácil manipulación en la obra.

Las propiedades del H.A.R en estado fresco, mencionados en el párrafo anterior, fueron evaluadas en dos condiciones: considerando la intervención del aditivo como superplastificante y como reductor de agua (HRWR), dado que sin el uso de aditivos no se hubiera podido conseguir hormigones con relaciones a/c así de bajas.

Se realizó el diseño de estas dosificaciones, como indica el ACI 211.4R, para lo cual se desarrolló una hoja de cálculo, programada para el uso selectivo de las tablas 4.6 y 4.7.

Como ya se expuso anteriormente, el aditivo EUCON 37 cumple dos funciones, la primera como fluidificante cuando la dosis está en el intervalo de valores de 0.5% a 1.0%, y la segunda actuando como reductor de agua de alto rango cuando su dosis es de 0.9% a 1.5%, estos valores corresponden al porcentaje en peso de cemento.

En el proceso de fundición se utilizaron porcentajes de 0.5% y 1% para evaluar el aditivo como fluidificante, y adicionalmente se usó 1% y 1.5% como reductor de agua de alto rango que controlarían la cantidad de agua en cada mezcla; esta segunda fase del uso del aditivo es de suma importancia, ya que si se disminuye la cantidad de agua, se podrían lograr resistencias aún mayores.

En cada alternativa de mezcla se determinó trabajabilidad y asentamiento, haciéndose las correcciones necesarias de la cantidad de agua en los casos que se lo requería para lograr la trabajabilidad deseada, debido a que las cuatro dosificaciones de prueba que se contemplan a continuación, fueron diseñadas con agregados con contenido de humedad diferente de cero; en el agregado grueso se determinaron valores de contenido de humedad que oscilaban alrededor de 2.69%; mientras que para la arena, se obtuvo un contenido de humedad de 5.26%. Dado que estas variaciones pueden representar un problema

en el valor de resistencia a compresión que se desea conseguir, se estima conveniente trabajar las dosificaciones definitivas con material seco, es decir sin humedad en el agregado.

Es importante aclarar que estas mezclas fueron diseñadas sin la adición de fibras, por lo que se consideró indispensable lograr un asentamiento mayor en el hormigón patrón, sin sacrificar su resistencia, ya que la adición de fibras se prevé le restará trabajabilidad al conjunto.

Se fabricaron probetas cilíndricas, de las mezclas realizadas, para la determinación de la resistencia a edades de 3, 7 y 14 días, siendo esta secuencia de edades considerada suficiente para establecer si el crecimiento de resistencia es normal y adecuado para el hormigón.

Para cada edad, y según la norma NTE INEN 1573, se considera adecuado fabricar mínimo dos probetas, obteniendo así un valor lo suficientemente cierto de la resistencia de cada mezcla; sin embargo, en este proyecto se estimó conveniente trabajar con tres probetas para cada edad, de forma que se puedan obtener mayor confiabilidad en los resultados.

Con el análisis de los valores obtenidos en las mezclas de prueba, se buscó definir el porcentaje de aditivo que mejor desempeño presenta en el hormigón en estado fresco, y aquel con el que se consiga el mayor esfuerzo de compresión o características mecánicas en estado endurecido.

A continuación se presentan las tablas correspondientes a las dosificaciones y resistencias a compresión conseguidas con cada una de las alternativas analizadas.

4.2.6.1 Dosificación 1: 0.5% de aditivo fluidificante

La siguiente dosificación se realiza para la fabricación de 15 probetas cilíndricas, cerca de 24 litros de mezcla, en las cuales se contemplan tres (3) especímenes

por edad, testigos de reserva, pérdidas durante manipulación y residuos en equipos, además del volumen excedente necesario que se considera para una adecuada compactación.

Los datos considerados para el diseño son los siguientes:

Volumen de dosificación: 15 cilindros = 23.56 litros

Relación a/c: 0.31

Resistencia esperada $f'c$: 500 kg/cm²

Asentamiento esperado: 5 cm

Luego de realizar todos los pasos enumerados en el apartado 4.2.4, se obtuvieron las siguientes cantidades de agregados, cemento y agua.

Proporciones:

Agua: 3.6 kg

Cemento: 12.1 kg

Arena: 15.7 kg

Ripio: 23.8 kg

FIGURA 4.5 PROPORCIONES DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

El aditivo en esta dosificación corresponde al 0.5 % del peso del cemento que se use para este volumen.

% Aditivo EUCON 37: 0.50 %
 Peso Aditivo: 60.3 gramos

Se determina el asentamiento de la mezcla después de la colocación del aditivo, para poder apreciar la influencia del mismo en la mezcla.

Asentamiento: 1 cm

FIGURA 4.6 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 0.5% DE ADITIVO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

En vista de que el asentamiento debe ser de 5 cm, se procede a realizar correcciones en la cantidad de agua.

Primera Corrección: 1839.6 gr de adición de agua
 Asentamiento con la 1ra corrección de agua: 2 cm

Con objetivo de darle mayor trabajabilidad al hormigón y llegar al asentamiento requerido se procede a realizar la segunda corrección de agua.

Segunda Corrección: 460.8 gr de agua adicionales
 Asentamiento con 2da corrección de agua: 4 cm

FIGURA 4.7 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 0.5% DE ADITIVO, CON CORRECCIÓN DE AGUA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

En total el agua adicionada como corrección fue de 2300.4 gr, que corresponde al 58.98% del agua de mezclado prevista, razón por la cual, el valor de la relación agua-cemento, aumentó a 0.42; sin embargo es adecuado mencionar en este punto, que el total de esta agua, no está destinada solamente a la lubricación de la mezcla, sino que también aporta a satisfacer la hidratación de los agregados, por cuanto en el agregado fino el porcentaje de absorción es el del 4.45% y la humedad del material es de 2.7%, mientras que para el agregado grueso, la absorción es de 2.52% teniendo una humedad de 2.1%.

La mezcla, después de la adición de agua se muestra más trabajable, sin embargo el moldeo de los especímenes debe realizarse en un tiempo corto, dentro de los diez primeros minutos, ya que después de este período el remezclado no es fácilmente realizado y la mezcla empieza a fraguar.

FIGURA 4.8 – MOLDEO DE ESPECÍMENES DE 100X200 mm.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

FIGURA 4.9 FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO A COMPRESIÓN.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

La Tabla 4.8 que se está a continuación, representa los mejores resultados obtenidos para probetas moldeadas con la dosificación antes detallada, las cuales fueron sometidas a ensayos de compresión con el fin de comparar las resistencias obtenidas, considerando como variable directa al aditivo.

TABLA 4.8 ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS ELABORADAS CON MEZCLAS DE PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE ADITIVO (0.5% FLUIDIFICANTE)

N°	IDENTIF.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	CARGA (Ton)	PESO ESP. (T/m3)	F'c (Kg/cm2)	F'c PROM. (Kg/cm2)
1	AR-0.5-1F	15-jul-14	18-jul-14	3	17,995	2,33	220,22	213,94
2	AR-0.5-2F	15-jul-14	18-jul-14	3	16,310	2,38	207,67	
3	AR-0.5-3F	15-jul-14	22-jul-14	7	26,038	2,33	321,80	263,30
4	AR-0.5-4F	15-jul-14	22-jul-14	7	17,065	2,27	204,81	
5	AR-0.5-5F	15-jul-14	29-jul-14	14	22,966	2,29	275,63	338,33
6	AR-0.5-6F	15-jul-14	29-jul-14	14	28,611	2,33	350,14	
7	AR-0.5-7F	15-jul-14	29-jul-14	14	26,420	2,32	326,52	

Elaborado por: Fanny G., Julia P

En las tablas siguientes, solamente se presentarán los valores obtenidos para las demás alternativas de dosificación, ya que la explicación de la mecánica y procedimiento empleados se ha detallado en párrafos anteriores.

4.2.6.2 Dosificación 2: 1.0% de aditivo fluidificante

Dosificación: 13 cilindros = 20.42 litros
 Relación a/c: 0.31
 Resistencia esperada f'c: 500 kg/cm2
 Asentamiento esperado: 7 cm

Proporciones:

Agua: 3.2 kg
 Cemento: 10.8 kg
 Arena: 13.0 kg
 Ripio: 20.7 kg

% Aditivo EUCON 37: 1.00%

Peso Aditivo: 108.2 gramos

Asentamiento cono (sin corrección de agua): 0 cm

FIGURA 4.10 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 1% DE ADITIVO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

Primera Corrección de agua:	1924.9 gr
Asentamiento:	2 cm
Segunda Corrección de agua:	175.1 gr
Asentamiento:	21 cm

FIGURA 4.11 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 1% DE ADITIVO, PARA LA SEGUNDA CORRECCIÓN.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

Total de agua corregida:	2100.0 gr
% corrección, respecto al agua de mezclado inicial:	60.00%

Nueva Relación a/c: 0.42

**TABLA 4.9 ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS ELABORADAS CON
MEZCLAS DE PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE ADITIVO (1.0%
FLUIDIFICANTE)**

N°	IDENTIF.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	CARGA (Ton)	PESO ESP. (T/m3)	F'c (Kg/cm2)	F'c PROM. (Kg/cm2)
1	AR-1.0-1F	15-jul-14	18-jul-14	3	17,627	2,27	211,55	216,38
2	AR-1.0-2F	15-jul-14	18-jul-14	3	17,374	2,40	221,21	
3	AR-1.0-3F	15-jul-14	22-jul-14	7	25,036	2,31	312,49	281,63
4	AR-1.0-4F	15-jul-14	22-jul-14	7	23,013	2,31	281,63	
5	AR-1.0-5F	15-jul-14	29-jul-14	14	29,19	2,33	357,23	346,39
6	AR-1.0-6F	15-jul-14	29-jul-14	14	29,185	2,31	357,17	
7	AR-1.0-7F	15-jul-14	29-jul-14	14	26,020	2,33	324,77	

Elaborado por: Fanny G., Julia P

4.2.6.3 Dosificación 3: 1.0% de aditivo reductor de agua

Dosificación: 10 cilindros = 15.71 litros
 Relación a/c: 0.38
 Resistencia esperada f'c: 500 kg/cm²
 Asentamiento esperado: 5 cm.

Proporciones:

Agua: 2.4 kg
 Cemento: 6.6 kg
 Arena : 11.9 kg
 Ripio: 15.9 kg

% Aditivo EUCON 37: 1.00%

Peso Aditivo: 66.2 gramos.

Asentamiento (sin corrección de agua): 0 cm.

Primera Corrección de agua: 750 gr

Asentamiento: 2 cm

Segunda Corrección de agua: 140.0 gr

Asentamiento: 5 cm

Total de agua corregida: 890.0 gr
 % corrección, respecto al agua de mezclado inicial: 33.71%
Nueva Relación a/c: 0.43

FIGURA 4.12 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 1% DE ADITIVO HRWR.



Elaborado por: Fanny G., Julia P

TABLA 4.10 ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS ELABORADAS CON MEZCLAS DE PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE ADITIVO (1.0% REDUCTOR DE AGUA)

N°	IDENTIF.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	CARGA (Ton)	PESO ESP. (T/m3)	F'c (Kg/cm2)	F'c PROM. (Kg/cm2)
1	AR-1.0-1R	18-jul-14	21-jul-14	3	16,643	2,39	211,91	209,69
2	AR-1.0-2R	18-jul-14	21-jul-14	3	16,623	2,35	207,48	
3	AR-1.0-3R	18-jul-14	25-jul-14	7	21,854	2,36	275,49	270,70
4	AR-1.0-4R	18-jul-14	25-jul-14	7	21,093	2,36	265,90	
5	AR-1.0-5R	18-jul-14	01-ago-14	14	27,899	2,39	355,22	336,37
6	AR-1.0-6R	18-jul-14	01-ago-14	14	26,625	2,34	325,84	
7	AR-1.0-7R	18-jul-14	01-ago-14	14	26,543	2,32	328,04	

Elaborado por: F. Guamán – J. Pilatasig

4.2.6.4 Dosificación 4: 1.5% de aditivo reductor de agua

Dosificación: 10 cilindros = 15.71 litros
 Relación a/c: 0.38
 Resistencia esperada f'c: 500 kg/cm²
 Asentamiento esperado: 5 cm

Proporciones:

Agua: 2.9 kg (Incluyendo la corrección inicial de 500gr)

Cemento: 6.6 kg

Arena: 11.9 kg

Ripio: 15.9 kg

% Aditivo EUCON 37: 1.50 %

Peso Aditivo: 99.3 gramos

Asentamiento cono (sin corrección de agua): 0 cm

Primera Corrección de agua: 500.0 gr

Asentamiento: 0.0 cm.

Segunda Corrección de agua: 250.0 gr

Asentamiento: 3.7 cm

Total de agua corregida: 750.0 gr

% corrección, respecto al agua de mezclado inicial: 28.41%

Nueva Relación a/c: 0.41

FIGURA 4.13 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLAS CON 1.5% DE ADITIVO HRWR.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 4.11 ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS ELABORADAS CON MEZCLAS DE PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE ADITIVO (1.5% REDUCTOR DE AGUA)

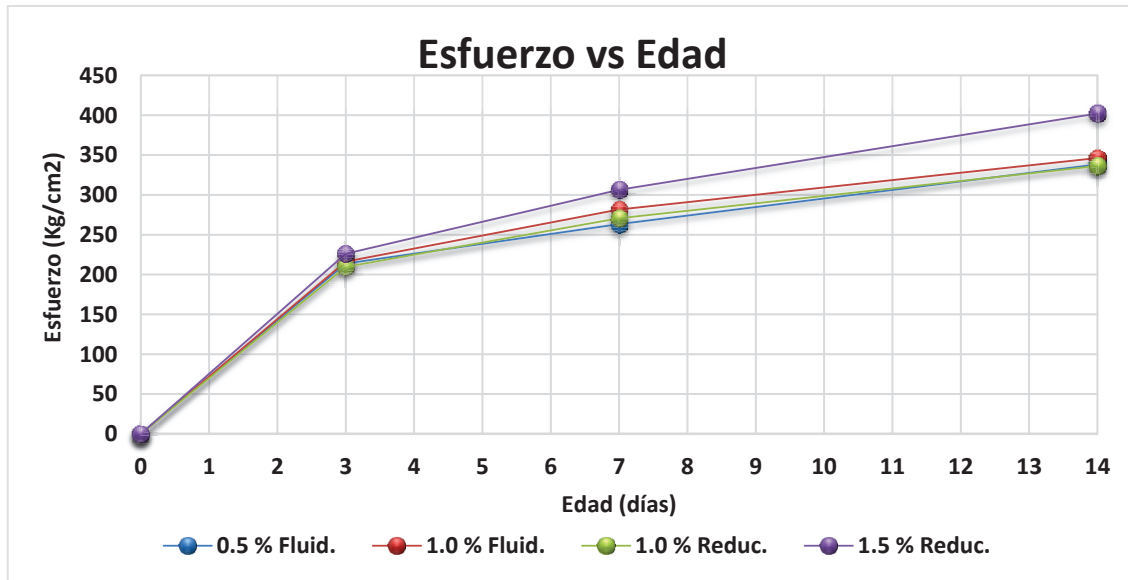
N°	IDENTIF.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	CARGA (Ton)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	F'c PROM. (Kg/cm ²)
1	AR-1.5-1R	18-jul-14	21-jul-14	3	18,558	2,35	231,63	226,17
2	AR-1.5-2R	18-jul-14	21-jul-14	3	18,035	2,36	220,71	
3	AR-1.5-3R	18-jul-14	25-jul-14	7	24,558	2,35	306,52	306,52
4	AR-1.5-4R	18-jul-14	25-jul-14	7	28,719	2,35	358,46	
5	AR-1.5-5R	18-jul-14	01-ago-14	14	30,688	2,39	383,03	402,22
6	AR-1.5-6R	18-jul-14	01-ago-14	14	33,763	2,36	421,41	
7	AR-1.5-7R	18-jul-14	01-ago-14	14	27,997	2,37	349,45	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Los resultados de los ensayos a compresión de estas mezclas se detallan en las Tablas 4.9 a la 4.11 y se resumen en las Figuras 4.14 y 4.15.

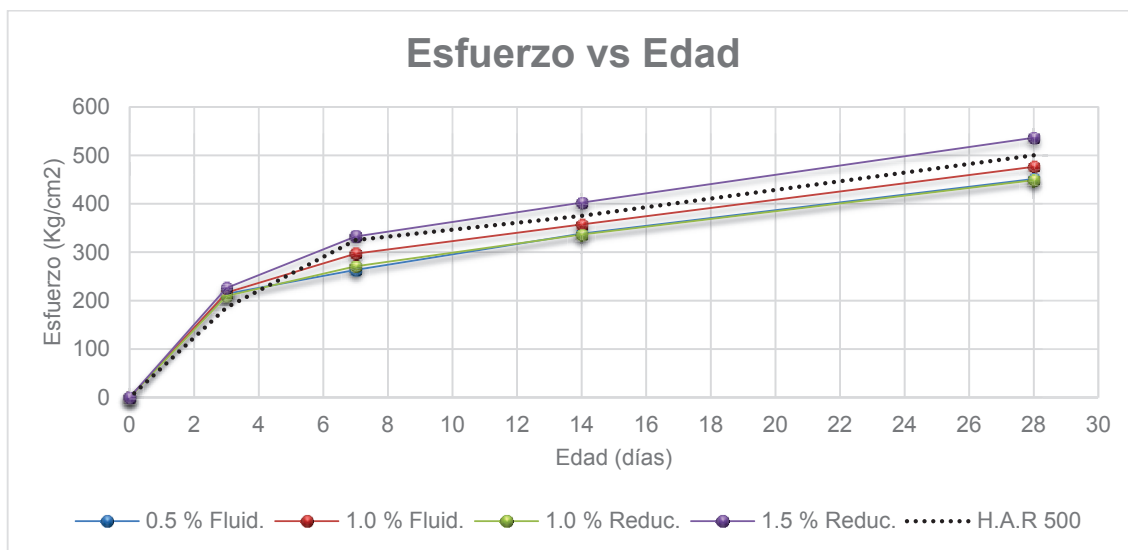
La Figura 4.14, muestra el desarrollo de las curvas de resistencia respecto a la edad del hormigón, de las cuatro mezclas de prueba realizadas. Este gráfico fue construido con los valores obtenidos para la resistencia hasta los 14 días de edad; además se realizó la proyección de resistencias que se conseguirían a los 28 días de edad de cada una de ellas, lo que se muestra en la Figura 4.15, que concuerdan con las resistencias de diseño, manteniendo una uniformidad de comportamiento con el desarrollo de resistencias teórico.

FIGURA 4.14 COMPARACIÓN ENTRE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES DE CADA MEZCLA REALIZADA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ADITIVO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.15 COMPARACIÓN ENTRE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES DE CADA MEZCLA REALIZADA EN FUNCIÓN DEL % DE ADITIVO Y SU PROYECCIÓN A LOS 28 DÍAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Estos resultados permiten establecer que el porcentaje más adecuado del aditivo, dentro del rango recomendado por el fabricante, es el 1.5% usado como reductor de agua, ya que con éste se permite efectivamente reducir la cantidad de agua de mezclado, bajar la relación a/c y en consecuencia mayores resistencias.

Se puede apreciar que los valores de resistencia a compresión para probetas fabricadas con el uso de 1.5% de aditivo como reductor de agua, son mucho mayores que aquellos correspondientes a las mezclas realizadas con el 0.5% y 1% de aditivo, e incluso son mayores que aquellos de la curva normal esperada para un hormigón de 500 Kg/cm².

Todas las probetas para los ensayos posteriores, se prepararon con la mezcla diseñada con 1.5% de aditivo, considerada como la mejor, esto es:

TABLA 4.12 PORCENTAJES DE AGREGADOS GRUESO, FINO Y CEMENTO UTILIZADOS PARA LA MEZCLA PATRÓN

Material	Peso (kg)	Porcentaje
Agua	3,4	
Cemento	6,6	20%
Piedra	15,5	46%
Arena	11,3	34%
Total de agregados, sin agua	33,4	100%

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

4.2.6.5 Rangos de Aceptación de los Resultados del Ensayo a Compresión

Con los valores promedios de resistencia que constan en las Tablas 4.13 a 4.16, se puede comprobar que los valores obtenidos se mantienen dentro del rango aceptable de variación de resistencia de cilindros individuales, tanto para dos como para tres especímenes cilíndricos.

Los valores que definen cada intervalo de variación, para cilindros tanto de 150 x 300 mm y de 100 x 200 mm, sean en condiciones de campo o laboratorio, se presenta en el apartado 4.7, Tabla N°4 de la norma NTE INEN 1573:2010.

A continuación, se presentan cuatro tablas, cada una correspondiente a cada mezcla realizada con los diferentes porcentajes de aditivo empleados. Cada tabla contiene además, el cálculo del rango de aceptación de la variabilidad de resistencia de cilindros.

TABLA 4.13 RANGO ACEPTABLE DE RESISTENCIA DE CILINDROS CON MEZCLAS CON 0.5% FLUIDIFICANTE.

N°	IDENTIF.	F'c (Kg/cm ²)	F'c PROM. (Kg/cm ²)	RANGO ACEPTABLE DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA DE CILINDRO INDIVIDUALES	
2 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio				+ 9,0%	- 9,0%
1	AR-0.5-1F	220,22	213,94	200,40	240,04
2	AR-0.5-2F	207,67		188,98	226,36
3	AR-0.5-3F	321,80	263,30	292,84	350,76
4	AR-0.5-4F	204,81		186,37	223,24
3 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio				+ 10,6%	- 10,6%
5	AR-0.5-5F	275,63	338,33	246,41	304,84
6	AR-0.5-6F	350,14		313,03	387,26
7	AR-0.5-7F	326,52		291,91	361,13

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 4.14 RANGO ACEPTABLE DE RESISTENCIA DE CILINDROS CON MEZCLAS CON 1.0% (FLUIDIFICANTE)

N°	IDENTIF.	F'c (Kg/cm ²)	F'c PROM. (Kg/cm ²)	RANGO ACEPTABLE DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA DE CILINDRO INDIVIDUALES	
2 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio				+ 9,0%	- 9,0%
1	AR-1.0-1F	211,55	216,38	192,51	230,59
2	AR-1.0-2F	221,21		201,30	241,12
3	AR-1.0-3F	312,49	281,63	284,36	340,61
4	AR-1.0-4F	281,63		256,29	306,98
3 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio				+ 10,6%	- 10,6%
5	AR-1.0-5F	357,23	346,39	319,36	395,09
6	AR-1.0-6F	357,17		319,31	395,03
7	AR-1.0-7F	324,77		290,34	359,19

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 4.15 RANGO ACEPTABLE DE RESISTENCIA DE CILINDROS CON MEZCLAS CON 1.0% (REDUCTOR)

N°	IDENTIF.	F'c (Kg/cm ²)	F'c PROM. (Kg/cm ²)	RANGO ACEPTABLE DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA DE CILINDRO INDIVIDUALES	
				+ 9,0%	- 9,0%
2 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio					
1	AR-1.0-1R	211,91	209,69	192,83	230,98
2	AR-1.0-2R	207,48		188,81	226,15
3	AR-1.0-3R	275,49	270,70	250,70	300,29
4	AR-1.0-4R	265,90		241,97	289,83
3 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio					
5	AR-1.0-5R	355,22	336,37	317,57	392,87
6	AR-1.0-6R	325,84		291,30	360,37
7	AR-1.0-7R	328,04		293,27	362,81

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 4.16 - RANGO ACEPTABLE DE RESISTENCIA DE CILINDROS PARA MEZCLAS CON 1.5% (REDUCTOR)

N°	IDENTIF.	F'c (Kg/cm ²)	F'c PROM. (Kg/cm ²)	RANGO ACEPTABLE DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA DE CILINDRO INDIVIDUALES	
				+ 9,0%	- 9,0%
2 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio					
1	AR-1.5-1R	231,63	226,17	210,79	252,48
2	AR-1.5-2R	220,71		200,85	240,58
3	AR-1.5-3R	306,52	306,52	278,93	334,11
4	AR-1.5-4R	358,46		326,20	390,72
3 Cilindros de 100 por 200 mm, en Condiciones de Laboratorio					
5	AR-1.5-5R	383,03	402,22	342,43	423,63
6	AR-1.5-6R	421,41		376,74	466,08
7	AR-1.5-7R	349,45		312,40	386,49

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Es válido acotar, que los valores fueron seleccionados según el crecimiento de la resistencia del hormigón en función del tiempo, eliminando los que presentaban dispersiones excesivas.

Se ratifica que el aditivo EUCON 39 funcionará de mejor manera como un aditivo reductor de agua de alto rango, es decir que se podrá evitar el uso de mayor cantidad de agua, conseguir una relación a/c más baja y, por consiguiente, mayores resistencias, las cuales se ven claramente expresadas en la Figura 4.15.

Por lo antes expuesto, queda definida la dosificación general patrón a partir de la última mezcla de prueba, sobre la cual se trabajará la optimización de la cantidad de fibras plásticas a adicionar.

4.2.7 MEZCLAS DEFINITIVAS

Sobre la base del estudio previo, el proyecto de investigación continúa usando las proporciones de la mezcla óptima de H.A.R, a partir de la cual se irán incorporando los porcentajes de fibra sintética de polietileno/polipropileno.

Las cantidades de fibra sintética a incorporar en el hormigón, de acuerdo a la recomendación del fabricante, fluctúan desde la dosis máxima es de 12 Kg/m^3 a la mínima es de 1.8 kg/m^3 ; en consecuencia por este estudio se ha creído conveniente el análisis del comportamiento del hormigón patrón con la inclusión de cuatro cantidades de fibra representativas: 2, 5, 8 y 12 kilos de fibra por cada m^3 de Hormigón.

En cada una de las alternativas de adición, al igual que en las mezclas de prueba para aditivo, se analizarán las propiedades del hormigón en estado fresco y posteriormente en estado endurecido.

En estado fresco se determinará su trabajabilidad por medio del cono de Abrams y en estado endurecido se determinará: Resistencia a Compresión, Módulos de Elasticidad, Flexión, Corte y una estimación de la Tenacidad.

FIGURA 4.16 PROBETAS FABRICADAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRA AÑADIDA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se fabricaron, especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm y viguetas de sección transversal de 100 x 100 mm y longitud de 400 mm, cumpliendo con lo permitido con las normas debido a que se trabaja con un agregado grueso de TM de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Las propiedades mecánicas se analizan a las edades de 3, 7, 14 y 28 días; la determinación de módulos de elasticidad y la estimación de la tenacidad lograda, se la hace para edades superiores de acuerdo con las recomendaciones técnicas, es decir, cuando se obtenga la resistencia de diseño, o ésta se desarrolle la suficiente, para ejecutar el ensayo y obtener un valor significativo para este tipo de hormigones.

Como ya se explicó en el Capítulo 2, las fibras utilizadas son de tipo sintéticas, fabricadas de polietileno/polipropileno, con una longitud de 50 mm o 2 pulgadas, de color blanco y con una absorción de agua prácticamente nula. El proveedor de estas fibras es la empresa Toxement Euclid Chemical, que patrocina este estudio.

Las proporciones mostradas a continuación constituyen las alternativas de diseño de mezclas definitivas para este proyecto de titulación. Si bien se consideraron diferentes volúmenes, las proporciones obtenidas para la mezcla patrón se conservaron a lo largo de todo el estudio.

Proporciones:

Agua: Será la cantidad suficiente para que se mantenga una relación a/c de 0,38.

Cemento:	20 %
Arena:	34 %
Ripio:	46 %
% Aditivo EUCON 37 :	1.50 %

Fibras Polipropileno/Polietileno TUF STRAND:

Primera Dosis:	2 Kg/m ³
Segunda Dosis:	5 Kg/m ³
Tercera Dosis:	8 Kg/m ³
Cuarta Dosis:	12 Kg/m ³

Cada mezcla preparada con la adición de fibras, fue realizada observando la siguiente secuencia:

1. Se pesaron los materiales suficientes para el volumen a ser fabricado, esto es: cemento, agregados, agua, aditivo y fibras.
2. Se prepara la mezcla en una mezcladora estacionaria eléctrica con capacidad para ½ saco de cemento.

3. Cuando la mezcla esté lista se procede a incorporar la fibra, obteniéndose un producto homogéneo.

FIGURA 4.17 MEZCLA DE H.A.R CON INCLUSIÓN DE FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

4. Se determina el Asentamiento de la mezcla, con el objetivo de apreciar su trabajabilidad y si va a ser de fácil colocación en obra.

FIGURA 4.18 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN MEZCLA CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5. Se moldean los especímenes, tanto cilíndricos como prismáticos para los ensayos requeridos de Resistencia a Compresión, Módulos de Elasticidad, Tenacidad, Flexión y Cortante.

FIGURA 4.19 MOLDEO DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.20 MOLDEO DE ESPECÍMENES PRISMÁTICOS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6. Se debe codificar cada espécimen colocando una identificación en cada uno, con la fecha de fundición y las características de la mezcla que se crean necesarias. En este caso se colocará el porcentaje de fibra que corresponde a cada mezcla.

FIGURA 4.21 ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.22 ESPECÍMENES PRISMÁTICOS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

7. Se procede a curar los especímenes por inmersión. Los cilindros permanecerán en la piscina de curado hasta su ensayo, cumpliendo los tiempos indicados en la norma NTE INEN 1573, **Tabla 2: Tolerancia de Tiempo permisible para el ensayo de especímenes**, para ser retirados del curado antes de ser ensayados.

FIGURA 4.23 CURADO DE ESPECÍMENES DE H.A.R CON FIBRAS.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

8. Se somete a los Ensayos de Compresión, Módulos de Elasticidad y Tenacidad, a especímenes cilíndricos. Para lo que se debe tomar los datos necesarios, y registrarlos previamente, es decir, datos geométricos de la probeta como son: diámetro, altura, y además del peso, datos que son necesarios para los cálculos posteriores.

FIGURA 4.24 ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE H.A.R CON FIBRAS.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.25 ENSAYO DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD EN H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

9. Se realizan Ensayos a Flexión y Corte en los especímenes prismáticos o viguetas; de igual forma que los especímenes anteriores, se deben registrar los datos necesarios de las viguetas, como son; secciones transversales de los extremos y central, además de longitud, etc., requeridos para los cálculos y determinación de sus resistencia a flexión y corte.

FIGURA 4.26 ENSAYO A FLEXIÓN, DE VIGUETAS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.27 ENSAYO A CORTANTE, DE VIGUETAS DE H.A.R CON FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

4.2.8 ENSAYOS EN HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.

Es importante determinar ciertas características del hormigón en estado fresco, principalmente la consistencia y contenido de aire, que ayudarán a tener una visión previa de las cualidades que esa mezcla tendrá en estado endurecido.

La consistencia determinada por medio del Cono de Abrams (NTE INEN 1578:2010), da una idea de la fluidez de la mezcla y está relacionada directamente con la relación agua/cemento. Además el contenido de aire (ASTM C231/C231M-14) que permite saber si la mezcla generará un hormigón poroso que afecte directamente a la resistencia futura. La determinación de estas propiedades se detalla a continuación:

4.2.8.1 Asentamiento (NTE INEN 1578:2010)

Este ensayo sirve para determinar la consistencia del hormigón en estado fresco. Se debe considerar que los valores obtenidos de este ensayo son significativos cuando el hormigón es cohesivo y plástico, es decir para valores de asentamiento comprendidos entre 15 y 230 mm.

Si el asentamiento es menor a 15 mm es un hormigón demasiado seco o no lo suficientemente plástico, pero si es mayor a 230 mm, por el contrario, podría resultar una mezcla no cohesiva por lo que, en estos casos, el criterio técnico es muy importante para la interpretación de los resultados.

El hormigón de alta resistencia tiende a ser un hormigón seco ya que las relaciones agua/cemento utilizadas son demasiado bajas.

Generalmente el estudio de estos hormigones requiere la realización de varias mezclas de prueba, las primeras considerando diseños sin aditivos para determinar el asentamiento que la mezcla posee de forma normal; y luego considerando la adición de un superplastificante para determinar cuál es el incremento de trabajabilidad que puede obtener.

En este proyecto es de vital importancia la trabajabilidad del hormigón dado que, aunque se trabajen con cantidades mínimas de agua, se pretende conseguir asentamientos moderados. Con la aplicación del aditivo HRWR se puede llevar al hormigón a su estado rheoplástico, es decir a un estado de fluidez conveniente sin llegar a presentar segregación.

Es prudente conseguir el mayor asentamiento en el hormigón receptor de las fibras, sin sacrificar su resistencia, básicamente porque al añadirle fibras dicho asentamiento disminuye significativamente, en relación directa con el porcentaje que se le añade. Este aspecto se puede evidenciar en la Tabla 6.53 y Figura 6.37 del Capítulo 6.

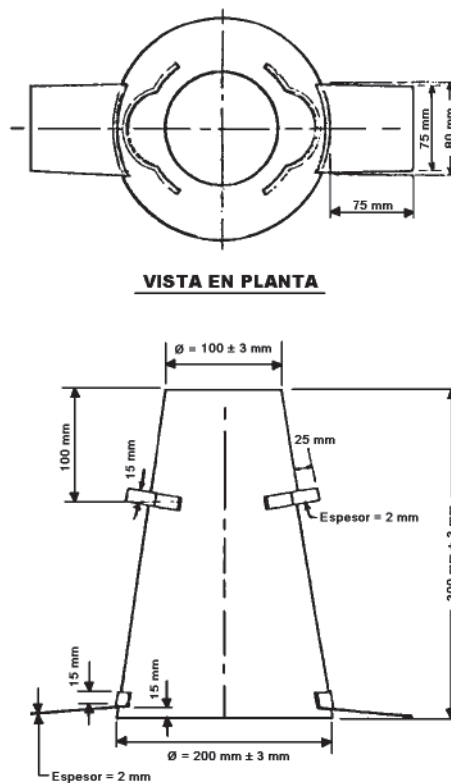
La trabajabilidad es importante debido a que el hormigón debe ingresar a todos los rincones del elemento estructural que con él se fabrique, sin dejar coqueas o la armadura de refuerzo expuesta, la cual se tornaría vulnerable dependiendo de las condiciones ambientales en las que se encuentre; además, si el hormigón es más seco, requerirá mayor trabajo para ser compactado.

El ensayo con el Cono de Abrams se desarrolla como indica la norma NTE INEN 1578:2010, proceso que consiste en la utilización de un molde con forma de un cono truncado, en el cual se vierte el hormigón que será compactado en tres capas iguales con la ayuda de una varilla.

El cono debe cumplir con las características geométricas que se muestran en la Figura 4.28, debe ser construido de tal forma que no tenga costura ni imperfecciones internas, es decir la superficie debe ser lisa sin deformaciones o residuos de hormigón.

La varilla de compactación debe ser lisa y recta, de acero de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con dos extremos de compactación redondeas, semiesféricas.

FIGURA 4.28 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA POR MEDIO DEL CONO DE ABRAMS



Fuente: NTE INEN 1578:2010.

Procedimiento:

Se debe humedecer los instrumentos previamente a su uso, para posteriormente sujetar el molde sobre una superficie plana, rígida y no absorbente.

El operador deberá estar parado sobre los dos estribos del cono para evitar que se levante por la presión del hormigón.

Se vierte el hormigón en tres capas, cada una correspondiente a un tercio del volumen del cono de Abrams

Se va compactando cada tercio con 25 golpes de la varilla uniformemente alrededor de todo el perímetro y hacia el centro de la capa de hormigón.

Se compactará cada capa en toda su profundidad, es decir procurando que la varilla apenas penetre a la capa anterior

Para la tercera capa se debe procurar tener un exceso de forma que al finalizar los 25 golpes que le corresponden pueda ser enrasada y nivelada.

FIGURA 4.29 ENRASE Y NIVELACIÓN DE LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN, EN EL CONO DE ABRAMS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se limpia el área que rodea al cono de forma que no se ocasione interferencia con la determinación del asentamiento. En todo momento se debe continuar presionando el cono hacia abajo contra la superficie que lo soporta.

A continuación se debe proceder a retirar el cono de forma vertical y sin producir torsión o movimientos laterales, esto en un tiempo estimado de 5 ± 2 segundos.

Se voltea el cono y coloca al lado de la masa de hormigón para proceder a la ubicación de la varilla sobre su borde superior y medir, desde el centro desplazado de la masa de hormigón hasta este borde inferior de la varilla, el valor de asentamiento que sufrió dicho hormigón.

FIGURA 4.30 DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO MEDIANTE CONO DE ABRAMS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se realizará un nuevo ensayo para la determinación de asentamiento si en el momento de levantar el cono se produce un desprendimiento o corte de la masa de hormigón.

Con el análisis apreciativo del asentamiento del hormigón se puede denominar a la mezcla blanda, fluida o seca.

FIGURA 4.31 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R SIN FLUIDIFICANTE

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.32 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R CON 0.5% FLUIDIFICANTE

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.33 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R CON 1% FLUIDIFICANTE

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.34 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R CON 1% REDUCTOR

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.35 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R CON 1.5% REDUCTOR

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.36 ASENTAMIENTO EN MEZCLA DE H.A.R CON ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

4.2.8.2 Determinación de Contenido de Aire (ASTM C231/C231M-14)

El recipiente utilizado para este ensayo dependerá del TMN del agregado grueso, por lo que para este proyecto que utiliza piedra de TMN de $\frac{1}{2}$; la Tabla 1 de la NTE INEN 1579, correspondiente a capacidad del recipiente de medición, el TMN más bajo es de 25 mm y se optará por este recipiente que es de 6 litros de capacidad.

FIGURA 4.37 CONTENIDO DE AIRE, EQUIPO NECESARIO PARA EL ENSAYO GRAVIMÉTRICO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 4.38 RECIPIENTE DE MEDICIÓN DE CONTENIDO DE AIRE.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Además debe disponerse de una placa de enrasado, varilla de compactación, mazo de goma y cucharón.

La forma de compactación al hormigón dentro del recipiente va a depender del asentamiento que presente el hormigón:

- Para hormigones con asentamientos mayores de 75mm se deberá compactar por varillado.
- Para asentamientos entre 25mm y 75mm se podrá compactar por varillado o vibración.
- Para asentamientos menores de 25mm se vibrará.

Puesto que este proyecto ha sido realizado con mezclas diseñadas con reductores de agua de alto rango, que generan un asentamiento de 50 mm, el proceso de compactación se realizará por varillado y tres capas de igual volumen; el número de capas dependen del tipo de compactación que se realice.

Se debe compactar cada capa uniformemente con 25 golpes, en toda su profundidad, en la capa inferior se debe procurar no golpear el fondo y en las

siguientes solamente permitir el paso a la otra capa en 25 mm aproximadamente. En la capa final se debe tener cuidado con el llenado excesivo.

Posteriormente se debe golpear el contorno de todo el recipiente de 10 a 15 veces con el mazo de goma, aplicando tal fuerza que cierre cualquier agujero formado por la varilla y permita la evacuación de cualquier burbuja de aire que se pudiera haber formado.

Al finalizar la compactación el recipiente no debe presentar llenado excesivo o deficiencias notables, se permite un exceso de alrededor de 3 mm sobre el borde del recipiente.

FIGURA 4.39 EVACUACIÓN DE BURBUJAS DE AIRE.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se enrasa la superficie y se limpia cuidadosamente el borde para evitar el daño del cierre hermético.

Se acopla la tapa, previamente se debe cerrar la llave de desfogue de presión y abrir las llaves de drenaje y llenado de agua y se cierra herméticamente.

FIGURA 4.40 ACOPLA DE TAPA EN EL RECIPIENTE.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se introduce agua por la llave de llenado, con ayuda de la perilla de inyección, hasta que el agua salga por la llave de drenaje.

FIGURA 4.41 INYECCIÓN DE AGUA.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se inclina un poco el recipiente para facilitar la salida de aire atrapado en bajo la tapa, se coloca nuevamente en posición horizontal y se inyecta más agua hasta que vuelva a salir por la llave de drenaje y se cierran bien las llaves.

Se aumenta la presión mediante la manipulación de la perilla de la bomba de mano, hasta que el manómetro indique la presión de inicio.

FIGURA 4.42 BOMBEO DE AIRE EN LA CÁMARA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se acciona la llave de comunicación del depósito con el recipiente por alrededor de 5 segundos.

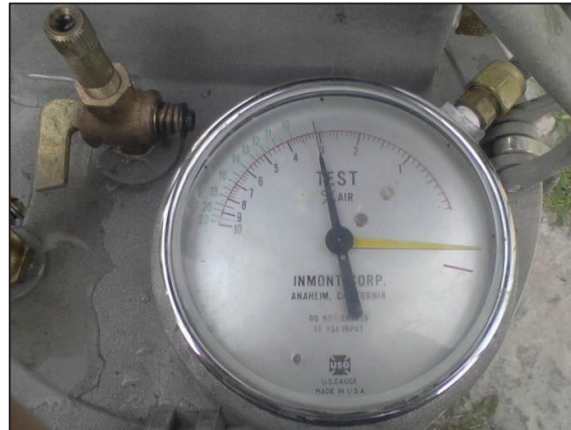
FIGURA 4.43 ACCIONAMIENTO DE LA LLAVE DE COMUNICACIÓN DEL DEPÓSITO Y EL RECIPIENTE.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se debe golpear el manómetro suavemente para que estabilice el indicador el cual mostrará el contenido de aire de la mezcla directamente.

FIGURA 4.44 CONTENIDO DE AIRE DE UNA MEZCLA DE H.A.R



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS DE LABORATORIO

5.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material heterogéneo que depende de múltiples variables, entre las cuales se puede mencionar: las propiedades físico-mecánicas de los materiales, proporciones de la mezcla, las condiciones ambientales, transporte, colocación, curado, entre otras; razón por la cual, existe un amplio rango de variabilidad en sus características finales.

Es conocido que los agregados en el hormigón constituyen alrededor del 75% del volumen total de la mezcla, por lo cual, sus propiedades mecánicas y características físicas influirán no sólo en la calidad y acabado final del hormigón, sino también en sus propiedades mecánicas como durabilidad y resistencia. Por esta razón es indispensable realizar ensayos de caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados y del cemento que se utilizarán en el estudio. Este tipo de ensayos brindan una valiosa información acerca la calidad, así se podrá reducir las variables a rangos controlados.

Las características de las minas y de los agregados en sí, pueden ir cambiando con el paso del tiempo y el estrato de explotación, en este Capítulo se realiza un control cuidadoso de las propiedades, por medio de ensayos normalizados, de modo que se puede estimar la variación éstas, desde el 2009, año en el que se realizó la investigación de H.A.R por parte de los Ingenieros Guadalupe-Gallegos, a la actualidad.

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS COMPONENTES.

5.2.1. AGREGADO GRUESO

Al ser la grava el componente que tiene mayor participación en la mezcla y que sus características afectan directamente a la resistencia a compresión de los hormigones de altas resistencias, se debe analizar cuidadosamente sus características; para este fin se practicarán los ensayos sugeridos en la norma NTE INEN 872 “Áridos para Hormigón. Requisitos”. Además de una inspección visual, la que verificará que no tengan fisuras ni planos débiles, que sea limpio y no contenga materia orgánica.

El ACI 211 4R, recomienda que el tamaño máximo del agregado grueso sea el menor posible para conseguir una mayor superficie de contacto entre la pasta y la grava, y como consecuencia mayor adherencia entre ellos.

5.2.1.1. Granulometría

La granulometría de un agregado determina cuantitativamente la distribución del tamaño de las partículas, por medio tamices de aberturas ordenadas progresivamente en forma decreciente, con estos resultados se puede determinar si el material cumple con la distribución granulométrica de las partículas estipulada en la norma NTE INEN 872, la cual busca que las partículas ocupen el mayor volumen posible en el hormigón, y reducir el contenido de vacíos en la mezcla, requerimientos importantes para obtener un hormigón de buena calidad y lo más económico posible, ya que reduce el contenido de pasta de cemento.

El ensayo para determinar la distribución granulométrica de las partículas del agregado grueso, se realizó siguiendo la norma NTE INEN 696 – ASTM C 136, cuyo procedimiento consiste en seleccionar la muestra de acuerdo a la norma

NTE INEN 695 – ASTM D75 y secar al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, en un promedio de 18 a 24 horas.

FIGURA 5.1 CUARTEO DE AGREGADO GRUESO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La muestra se la obtiene por cuarteo, hasta obtener una masa de 2 kg, según la Tabla 5.1 de este capítulo, correspondiente a la Tabla 1 de la norma NTE INEN 696, para agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

Escoger y ordenar en forma descendente los tamices necesarios y adecuados de la Serie de Tyler, de forma que cumplan con la gradación del árido a ensayarse. Las diferentes gradaciones se pueden obtener en la Tabla 5.2, que corresponde a la Tabla 3 de la norma NTE INEN 872.

Colocar la muestra por la parte superior del juego de tamices y agitar el conjunto por un intervalo de tiempo de 5 a 10 minutos.

Pesar la masa retenida en cada uno de los tamices y bandeja de fondo, cuidando que el peso total, después del ensayo, no difiera en $\pm 3\%$ del peso inicial de la muestra.

FIGURA 5.2 MUESTRA COLOCADA EN LA SERIE DE TAMICES CORRESPONDIENTES



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 5.3 MATERIAL RETENIDO EN LAS DIFERENTES MALLAS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 5.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DEL ÁRIDO GRUESO

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas en, mm.	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg)
9,5	1
12,5	2
19	5
25	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Fuente: Norma NTE INEN 696.

TABLA 5.2 REQUISITOS DE GRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO

Número de tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
		100mm	90mm	75mm	63mm	50mm	37,5mm	25,0mm	19,0mm	12,5mm	9,5mm	4,75mm	2,36mm	1,18mm	300µm
1	de 90 a 37,5	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	
2	de 63 a 37,5	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	
3	de 50 a 25,0	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	
357	de 50 a 4,75	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	---	0 a 5	---	---	
4	de 37,5 a 19,0	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	
467	de 37,5 a 4,75	---	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---	
5	de 25,0 a 12,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---	---	
56	de 25,0 a 9,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---	
57	de 25,0 a 4,75	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---	
6	de 19,0 a 9,5	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---	
67	de 19,0 a 4,75	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	
7	de 12,5 a 4,75	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---	
8	de 9,5 a 2,36	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	de 9,5 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 ^A	de 4,75 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

^A Al árido con número de tamaño 9, se lo define en la NTE INEN 694 como árido fino. Se lo incluye como árido grueso cuando está combinado con un material con número de tamaño 8 para crear el número de tamaño 89, que es árido grueso según se define en la NTE INEN 694.

Fuente: Norma NTE INEN 872

Con el peso retenido en cada tamiz y el peso total de la muestra, se calcula el porcentaje retenido, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa cada tamiz, mediante las siguientes expresiones:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido en cada tamiz} \times 100}{\text{peso de muestra total}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

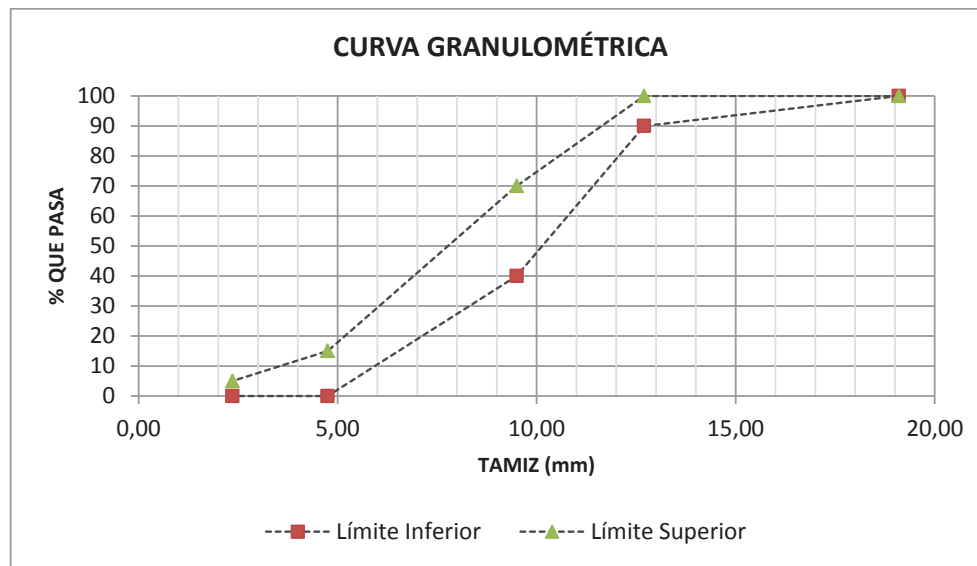
$$\% \text{ retenido acumulado} = \sum \% \text{ retenidos hasta ese tamiz} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ que pasa} = 100\% - \% \text{ retenido acumulado} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Con los datos obtenidos de los porcentajes que pasa por cada tamiz y el tamaño de la abertura de cada malla, se elabora la gráfica del % que pasa, versus, el tamaño del tamiz en mm, a la que se le conoce como curva granulométrica (Figura 5.5).

La curva granulométrica que contiene los límites granulométricos de la piedra #7, correspondientes a la gradación del árido grueso de Pifo, es la que se presenta en la Figura 5.4.

FIGURA 5.4 REPRESENTACIÓN DE LOS LÍMITES DE GRADACIÓN PARA LA PIEDRA #7.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

El análisis granulométrico permite, además, determinar el índice de finura (**Módulo de Finura**), este indicador propuesto por Duff Abrams corresponde a la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices propuestos para áridos gruesos en la serie de Tyler (Tabla 5.3), dividida para 100.

TABLA 5.3 SERIE TYLER DE TAMICES AGREGADOS GRUESOS

Tamices módulo de finura	
Tamiz	Abertura (mm)
3"	76,2
1 ½ "	38,1
¾ "	19,1
3/8 "	9,5
N° 4	4,75

Fuente: Luna, G., (2014). Estudio del hormigón. Quito - Ecuador

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados de los tamices serie Tyler}}{100} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Los valores promedio que se obtuvieron al realizar dos ensayos de granulometría consecutivos se muestran a continuación:

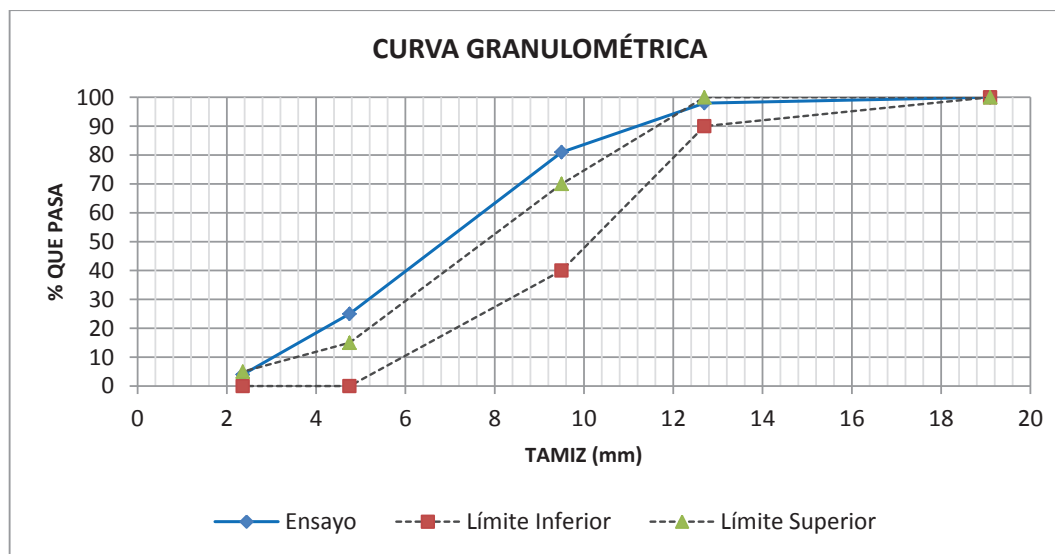
TABLA 5.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (gr)	Peso Retenido Acum. (gr)	% Retenido Acum.	% Que Pasa	Norma Inen 872	
						Mín.	Máx.
3/4	19,10	0,00	0,00	0	100	100,00	100,00
1/2	12,70	125,35	125,35	2	98	90,00	100,00
3/8	9,50	859,20	984,55	19	81	40,00	70,00
4	4,75	2768,20	3752,75	75	25	0,00	15,00
8	2,36	1062,00	4814,75	96	4	0,00	5,00
BAND.		178,60	4993,35	100	0		
Σ:		4993,35					

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

W_{MUESTRA}: 5.000 g
% Pérdida: 0,13% < 3,0% O.K
Módulo de Finura (MF): 5,90

FIGURA 5.5 CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.2. Peso Específico y Absorción

El peso específico de un agregado relaciona el peso y el volumen del material, cuando éste se encuentre en una condición específica: seca, natural o SSS. La condición SSS, superficie saturada seca, quiere decir que los poros de las partículas se encuentren llenos de agua pero sin considerar agua en su superficie exterior.

Por otro lado, la absorción determina el cambio de peso de un agregado, debido a la cantidad de agua absorbida por los poros de las partículas al estar sumergida en agua durante el tiempo necesario para alcanzar la condición de saturación, y compararla con el peso del material en condición seca. El procedimiento a seguir se encuentra el descrito en la norma NTE INEN 857 o ASTM C 127, y corresponde al que se describe a continuación:

Tomar la muestra de grava según lo indicado en la norma NTE INEN 695, lavarla para quitarle el polvo de los finos, determinar el peso de la masa mínima, 2000 gr según indica la norma en la Tabla 5.5, y que corresponde a la Tabla 1 de la norma NTE INEN 857, y proceder a sumergirla en agua durante $24h \pm 4h$.

FIGURA 5.6 LAVADO DE ÁRIDO GRUESO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Retirar la muestra del agua, y colocarla sobre un paño, para eliminar toda lámina visible de agua en la superficie de las partículas, evitando la evaporación del agua de los poros, determinar el peso de la muestra en condición saturada superficialmente seca.

FIGURA 5.7 AGREGADO EN CONDICIÓN SSS Y CANASTILLA

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Para determinar el volumen, colocar la muestra en una canastilla, y sumergirla en agua a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, agitar para eliminar todo el aire atrapado y obtener su peso sumergido. Previamente, se debe obtener el dato del peso de la canastilla vacía sumergida.

Sacar la muestra del agua y poner a secar en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Finalmente, dejar enfriar y determinar su peso en estado seco.

FIGURA 5.8 PESO DE CANASTILLA SUMERGIDA

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 5.5 TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DEL ÁRIDO GRUESO.

Tamaño máximo nominal mm	Masa mínima de la muestra para ensayo, kg
12,5 o menor	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	8
90	25
100	40
125	75

Fuente: Norma NTE INEN 857

Para los cálculos de peso específico, peso específico en superficie saturada seca y absorción se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SH): } \frac{A}{B-C} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS): } \frac{B}{B-C} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS): } \frac{A}{A-C} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

$$\text{Absorción, \%: } \frac{B-A}{A} * 100 \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Donde,

A: Peso del Material Seco en Aire

B: Peso de la Muestra en Superficie Saturada Seca

C: Peso de la Muestra sumergida en Agua.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar el ensayo anteriormente descrito:

TABLA 5.6 RESULTADOS DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO PIFO

DENSIDAD RELATIVA (Gravedad Específica)	
Densidad relativa(gravedad específica) (SH):	$\frac{A}{B-C} = 2.53 \text{ gr/cm}^3$
Densidad relativa(gravedad específica) (SSS):	$\frac{B}{B-C} = 2.59 \text{ gr/cm}^3$
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS):	$\frac{A}{A-C} = 2.70 \text{ gr/cm}^3$
Absorción de agua:	$\frac{B-A}{A} * 100 = 2.49 \text{ gr/cm}^3$

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.3. Densidades Aparentes

El peso volumétrico unitario de un agregado relaciona el peso neto y el volumen del material que éste ocupa en un recipiente estándar de masa y volumen conocidos, expresado en Kg/m^3 ; dichas densidades son utilizadas en las conversiones de volumen a masa, para el diseño de dosificaciones de hormigón en peso. Este valor es dependiente de la compactación, es decir de su condición de estado suelto o estado compactado.

Además esta relación indica la cantidad de pasta requerida para llenar los espacios vacíos entre partículas de los agregados y paredes del molde; esto significa que, si en un agregado el peso volumétrico disminuye, se incrementan los espacios vacíos para ser llenados con la pasta, lo que afecta el costo y el comportamiento del hormigón en el tiempo, esto último reflejado en el aumento de la fluencia y la retracción del material.

Esta propiedad es de suma importancia ya que un mal cálculo del peso volumétrico puede generar costos excesivos, material defectuoso o que no cumpla con los requisitos técnicos especificados en la obra. En un agregado con tamaño máximo nominal de 125 mm o 5 pulgadas no es aplicable realizar este método de ensayo.

FIGURA 5.9 RECIPIENTE ESTÁNDAR PARA PESOS UNITARIO

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.3.1. Densidad aparente suelta

Se define como la relación entre el peso y el volumen que ocupa el agregado cuando se vierte en un recipiente sin apisonamiento alguno y evitando inducir vibraciones.

Así, se puede describir el procedimiento detallado en la norma NTE INEN 858:

- Obtener la muestra y reducirla por cuarteo (NTE INEN 2566) hasta un tamaño aproximado a un 125 a 200% de la cantidad requerida para el ensayo.
- Secar la muestra en un horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante.
- Dejar enfriar la muestra hasta que sea manipulable.
- De acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado escoger el molde con la capacidad nominal correspondiente, según la tabla 5.7, esto en el caso de agregado grueso.
- Determinar el volumen del recipiente, previamente calibrado, para esto se miden las dimensiones del recipiente, como son: largo, ancho y altura, o diámetro y altura.
- Pesar y registrar el molde vacío
- Con ayuda de una pala o cucharón colocar el agregado dentro del recipiente con la única compactación que obtenga el agregado al caer desde la pala a una altura no mayor a 50 mm por encima del borde superior del molde

procurando evitar, tanto como sea posible, las vibraciones y segregación de las partículas.

- Con la varilla, enrasar la superficie y con la brocha limpiar el material excedente en los bordes.
- Determinar y registrar el peso del molde más agregado suelto, teniendo cuidado en no provocar vibraciones excesivas en este proceso.

FIGURA 5.10 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD SUELTA PARA AGREGADO GRUESO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.3.2. Densidad aparente compactada

Viene dada por la relación de la masa por unidad de volumen del árido cuando éste se vierte en un recipiente, y a la vez es compactado bajo condiciones específicas.

Enseguida se describen los pasos a seguir para determinar la densidad aparente compactada de agregado grueso, explicados en la norma NTE INEN 858.

- Obtener las muestra y reducirla (NTE INEN 2566).
- Secar la muestra en un horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante.
- Dejar enfriar la muestra hasta que sea manipulable.

- De acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado escoger el molde con la capacidad nominal correspondiente, según la tabla 5.7, para áridos gruesos.
- Determinar el volumen del recipiente, para esto se miden las dimensiones del recipiente, como son, altura y diámetro, o largo, ancho y altura.
- Pesar el molde vacío y registrar.
- Llenar el recipiente hasta un tercio del volumen, nivelar la superficie con los dedos y compactar con 25 golpes de la barra compactadora distribuidos uniformemente en toda la superficie. Cuidando no golpear el fondo. La barra de compactación será de 16 mm de diámetro, 60 cm de largo y puntas redondeadas
- Llenar y compactar el segundo tercio, como se indica en el paso anterior, evitando que la barra de compactación atravesase la primera capa de material.
- En la última capa, llenar hasta rebosar y compactar de la manera antes indicada; con la barra enrasar la superficie y con la brocha limpiar el material excedente en los bordes, y rellenar los espacios más grandes que se aprecien en la superficie.
- Determinar y registrar el peso del molde más agregado compactado.
- Realizar por lo menos dos veces el ensayo, para obtener valores representativos de densidad.

FIGURA 5.11 PROCESO DE DETERMINACIÓN DE DENSIDAD COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Las densidades suelta y compactada de los agregados finos, gruesos o mezcla de ambas hasta un tamaño menor a 125 mm, se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{P_2 - P_1}{V} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Donde,

P_1 = Peso del recipiente vacío.

P_2 = Peso del recipiente + material (suelto o compactado).

V = Volumen del recipiente.

TABLA 5.7 CAPACIDAD NOMINAL DE MOLDE

Tamaño máximo nominal del árido mm	Capacidad nominal del molde ^A m ³ [litros]
12,5	0,0028 [2,8]
25,0	0,0093 [9,3]
37,5	0,014 [14]
75,0	0,028 [28]
100,0	0,070 [70]
125,0	0,100 [100]

^A Capacidad del molde a utilizar para ensayar áridos de un tamaño máximo nominal igual o menor que el correspondiente en la lista. El volumen real del molde debe ser de al menos el 95% del volumen nominal indicado.

Fuente: Norma NTE INEN 857.

A continuación, se presenta la tabla de resultados de dos ensayos consecutivos, realizados para determinar las densidades aparentes suelta y compactada del agregado grueso de Pifo.

TABLA 5.8 RESULTADOS DE DENSIDADES APARENTES DEL AGREGADO GRUESO

DENSIDAD SUELTA			
PRUEBA N°	unidad	1	2
MOLDE N°		1237	1237
Diámetro ϕ	cm	15,20	15,20
Altura h	cm	15,40	15,40
Peso Molde(P1)	kg	1,90	1,90
Peso Molde + Agregado Suelto (P2)	kg	5,61	5,58
Volumen molde (V)	lt	2,79	2,79
Densidad Aparente Suelta	g/cm ³	1,33	1,32
DENSIDAD PROMEDIO	kg/m ³	1323,26	
DENSIDAD COMPACTADA			
PRUEBA N°	unidad	1	2
MOLDE N°		1237	1237
Diámetro ϕ	cm	15,20	15,20
Altura h	cm	15,40	15,40
Peso Molde(P1)	kg	1,90	1,90
Peso Molde + Agregado Compactado (P2)	kg	6,06	6,05
Volumen molde (V)	lt	2,79	2,79
Densidad Aparente Compactada	g/cm ³	1,49	1,48
DENSIDAD PROMEDIO	kg/m ³	1485,85	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.4. Contenido de Humedad

Los áridos pueden llegar a absorber agua que, en algunos casos, al ser mezclada químicamente con los minerales del árido se convierte en agua no evaporable, pero otra parte puede quedar como agua libre, por esta razón se necesita conocer si el agregado, en condiciones naturales, aporta o no agua libre a la mezcla de hormigón, y si lo hace, se debe determinar cuál es esa cantidad y así realizar la corrección adecuada en el diseño.

El ensayo para la caracterización de esta propiedad, es relativamente sencillo, sin embargo de gran influencia en la relación agua/cemento dentro del diseño del hormigón. Por ejemplo, si el material al momento de realizar una mezcla de hormigón, sea éste arena o grava, se encuentra completamente saturado, la relación agua/cemento aumentará, así, consecuentemente se obtendrá un asentamiento mayor y una disminución en la resistencia de diseño. Del mismo modo, si el material se encuentra seco, éste absorberá el agua necesaria para saturarse, reduciendo la cantidad de agua para hidratar el cemento, produciendo pastas demasiado secas, acelerando su fraguado y disminuyendo su trabajabilidad y resistencia.

El contenido de humedad en un material se define y determina como el porcentaje de agua evaporable por secado, ya sea ésta agua superficial o agua contenida en los poros abiertos del agregado.

El procedimiento correspondiente a este ensayo, fue realizado según indica la norma NTE INEN 862, y para esto primero se debe obtener una muestra según indica la norma NTE INEN 695, excepto por el tamaño de la muestra, que no tiene que ser menor a la indicada en la Tabla 5.9.

Se debe proteger la muestra ante una posible pérdida de humedad antes de pesarla. Pesar el recipiente metálico y colocar la cantidad de muestra requerida en él y determinar el peso del recipiente más muestra húmeda.

Secar en el horno de temperatura controlada a 110 °C, por un intervalo de tiempo de 24 ±3 horas. Luego de este tiempo dejar enfriar a temperatura ambiente y determinar el peso del recipiente con el material seco. Cuando las partículas de un agregado son mayores de 50 mm, puede ser que necesiten un mayor tiempo de secado.

El contenido total de humedad evaporable es calculado con la siguiente fórmula:

$$\%W = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso seco}} * 100 = \frac{P_2 - P_3}{P_3 - P_1} * 100 \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Donde,

P_1 : Peso del recipiente vacío.

P_2 : Peso del recipiente + muestra húmeda.

P_3 : Peso del recipiente + muestra seca.

Peso de agua: $P_2 - P_3$

Peso seco: $P_3 - P_1$

TABLA 5.9 MASA DE LA MUESTRA DEL AGREGADO EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL, PARA OBTENER CONTENIDO DE HUMEDAD.

Tamaño máximo nominal del árido (mm) ^A	Masa de la muestra de áridos de densidad normal, mínimo (kg) ^B
4,75	0,5
9,5	1,5
12,5	2
19	3
25	4
37,5	6
50	8
63	10
75	13
90	16
100	25
150	50

^A Basado en tamices que cumplen la NTE INEN 154.

^B Para áridos de baja densidad, determinar la masa mínima de la muestra multiplicando el valor señalado por la masa unitaria seca (peso volumétrico) del árido, en kg/m³ (determinado utilizando el procedimiento señalado en la NTE INEN 858) y dividiendo para 1.600

Fuente: Norma NTE INEN 858.

Sin embargo, para evitar que el contenido de humedad se convierta en una de las variables para la dosificación, se resolvió secar al horno tanto la grava como la arena, a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Para, de esta manera, contar siempre con un material en condiciones uniformes.

FIGURA 5.12 AGREGADO GRUESO EN PROCESO DE SECADO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 5.13 AGREGADO FINO EN PROCESO DE SECADO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.1.5. Resistencia a la Abrasión

La durabilidad del hormigón está en íntima relación con la resistencia al desgaste, mecánico o químico, que presente sus agregados principalmente el agregado

grosso. La resistencia al desgaste mecánico es el que se conoce como la resistencia a la abrasión.

Al realizar este ensayo se busca conocer el porcentaje de desgaste que se produce en un agregado al inducirse una fricción externa a sus partículas, con una carga abrasiva conocida y a una velocidad rotacional determinada, utilizando la Máquina de Los Ángeles.

La resistencia a la abrasión de un agregado permite determinar si el agregado cuenta con la capacidad suficiente para producir hormigones durables y resistentes; y se relaciona de manera directa a la resistencia a la compresión; es decir, a mayor resistencia a la abrasión, mayor resistencia a la compresión y viceversa.

FIGURA 5.14 MÁQUINA DE LOS ÁNGELES



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

El procedimiento a seguir para la determinación del valor de desgaste por abrasión, que corresponde al agregado utilizado, de tamaño mayor a 19 mm, se encuentra detallado en las normas NTE INEN 860 y ASTM C-131, y es el siguiente:

Reducir la muestra asegurándose que se encuentre limpia, si es necesario debe ser lavada, luego debe ser puesta en el horno para secarla a una temperatura de $105^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$; una vez que el árido sea manipulable, separar en fracciones

individuales por los tamices recomendados en la Tabla 5.10 y obtener la gradación más representativa en dichos rangos. Pesar y recombinar las porciones.

FIGURA 5.15 CUARTEADO Y COLOCACIÓN DE LA MUESTRA PARA EL PROCESO DE ABRASIÓN.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Con la gradación adecuada, consultar en la Tabla 5.11 y elegir el número de esferas, o la carga abrasiva que corresponde para el ensayo.

Colocar la muestra y el número de esferas seleccionadas en la máquina de los Ángeles y hacer rotar el tambor de la máquina, 100 y 500 revoluciones a una velocidad entre 30 y 33 rev./min; a las 100 y 500 revoluciones del tambor, se debe descargar el material de la máquina y realizar una separación preliminar a través del tamiz N°8, luego, la fracción que pasa dicho tamiz debe ser tamizada por el tamiz N°12.

De ser necesario, a las 500 revoluciones se debe, lavar y secar el material que pasa el tamiz N°12, de otra manera pesar y obtener su peso. Finalmente calcular el desgaste a la abrasión con la siguiente fórmula:

$$V(\%) = \frac{A - C}{A} * 100 \quad (\text{Ec. 5.11})$$

Donde,

V= Porcentaje del desgaste a la abrasión.

A= Peso inicial de la muestra.

C= Peso de la grava retenida en el tamiz N°12, a las 500 revoluciones

A-C= Pérdida por desgaste abrasivo.

TABLA 5.10 GRADACIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO.

Tamices INEN		Masa de los tamices indicados			
Pasa	Retenido en	Gradaciones			
		A	B	C	D
37,5 mm	26,5 mm				
26,5	19	1250 ± 25			
19	13	1250 ± 25			
13	13,2	1250 ± 10	2500 ± 10		
13,2	9,5	1260 ± 10	2501 ± 10		
9,5	6,7			2500 ± 10	
6,7	4,75			2501 ± 10	
4,75	2,36				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10 gr	5000 ± 10 gr	5000 ± 10 gr	5000 ± 10 gr

Fuente: Luna, G., (2014). Estudio del hormigón. Quito – Ecuador

TABLA 5.11 CARGA ABRASIVA EN FUNCIÓN DE LA GRADACIÓN DE LA MUESTRA

GRADACIÓN	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE L CARGA (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Luna, G., (2014). Estudio del hormigón. Quito - Ecuador

5.2.1.5.1. Coeficiente de Uniformidad

Para determinar si un agregado es de dureza uniforme, se debe determinar la pérdida por desgaste abrasivo después de 100 revoluciones, sin lavar y tamizado por la malla N°12, y relacionarla con la pérdida por desgaste a las 500 revoluciones en las mismas condiciones.

Dicha relación no debe ser mayor a 0.2 (20%), si esto es así se dice que los materiales tienen dureza uniforme, este coeficiente se determina con la siguiente fórmula:

$$CU = \frac{A - B}{A - C} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

Donde,

CU= Coeficiente de uniformidad

A= Peso inicial de la muestra.

B= Peso de la grava retenida en el tamiz N°12, luego de 100 revoluciones.

C= Peso de la grava retenida en el tamiz N°12, luego de 500 revoluciones.

Los resultados que se obtuvieron del ensayo de la resistencia a la abrasión y coeficiente de uniformidad de la Piedra # 7 de la mina de Pifo son los que se muestran a continuación:

TABLA 5.12 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Gradación	C
Número de esferas	8
Número de revoluciones	500
A = Peso Inicial	5000 grs.
B = Peso retenido en el Tamiz N° 12 a las 100 revoluciones	4685.55 grs.
C = Peso retenido en el Tamiz N° 12 a las 500 revoluciones	3595.70 grs.
D ₁₀₀ = Porcentaje de Pérdida a las 100 revoluciones	6.29%
D ₅₀₀ = Porcentaje de Pérdida a las 500 revoluciones	28.09%
Coeficiente de Uniformidad	0.22

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.2. AGREGADO FINO

5.2.2.1. Granulometría

El proceso utilizado para determinar la distribución granulométrica de las partículas del agregado fino es el mismo que para el agregado grueso, bajo las

Normas NTE INEN 696 y ASTM C 136, en las cuales especifica de la siguiente manera:

FIGURA 5.16 TAMIZADORA PARA AGREGADO FINO Y MUESTRA



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Obtener la muestra representativa y colocarla en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, en un promedio de 18 a 24 horas.

Enfriar y pesar la masa requerida; para el agregado fino, la norma indica que la masa mínima para realizar el ensayo es de 300 gramos.

Armar en forma descendente los tamices correspondientes a la serie de Tyler, Tabla 5.13, para agregados finos y colocar la muestra por la parte superior del conjunto.

Acoplar la serie en la máquina tamizadora, encenderla por un intervalo de tiempo de 5 a 10 minutos. Por último, se debe pesar el material retenido en cada tamiz y la bandeja de fondo, cuidando que el peso total, después del ensayo, no difiera en $\pm 3\%$ del peso inicial de la muestra.

FIGURA 5.17 TAMIZADO Y DETERMINACIÓN DEL PESO RETENIDO EN LAS DIFERENTES MALLAS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Se procede al cálculo del porcentaje que pasa con las siguientes fórmulas:

$$\% \textit{ retenido} = \frac{\textit{ peso retenido en cada tamiz} \times 100}{\textit{ peso de muestra total}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$\% \textit{ retenido acumulado} = \sum \% \textit{ retenidos hasta ese tamiz} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \textit{ que pasa} = 100\% - \% \textit{ retenido acumulado} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

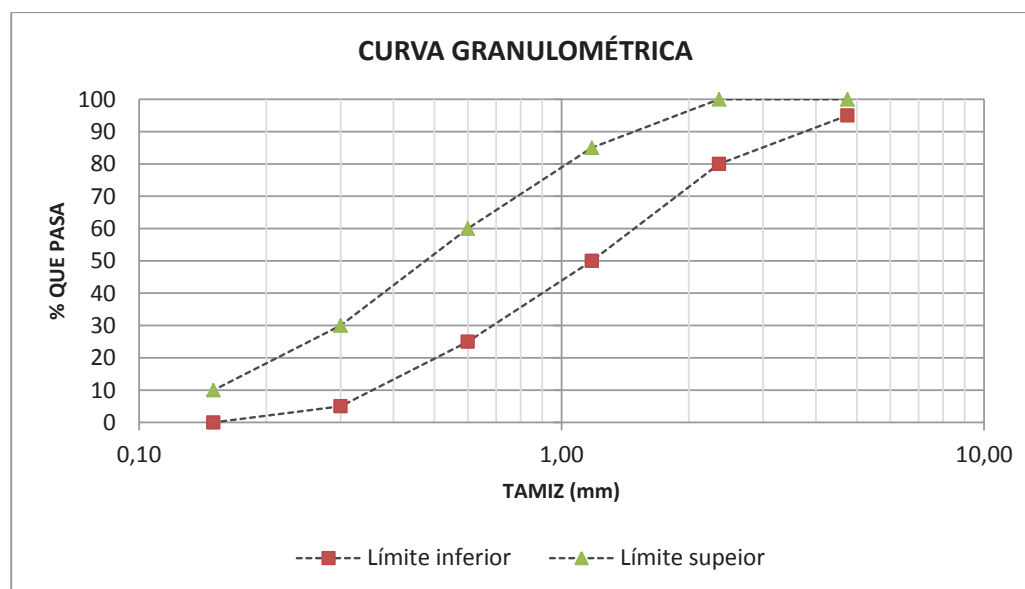
La curva granulométrica se obtiene al graficar el porcentaje que pasa por cada tamiz versus el tamaño de abertura de cada mall en mm, con los límites para el agregado fino que se encuentran indicados en la Tabla 5.13.

TABLA 5.13 REQUISITOS DE GRADACIÓN DEL ÁRIDO FINO

Tamiz	% Que pasa	
	Mín.	Máx.
N°4	95	100
N°8	80	100
N°16	50	85
N°30	25	60
N°50	5	30
N°100	0	10

Fuente: Norma NTE INEN 872

FIGURA 5.18 REPRESENTACIÓN DE LOS LÍMITES GRANULOMÉTRICOS PARA AGREGADO FINO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Para el cálculo del módulo de finura, al igual que para los agregados gruesos, sumamos los porcentajes retenidos acumulados en los tamices propuestos para áridos finos en la serie de Tyler (tabla 5.14), y dividiendo la sumatoria para 100.

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados de los tamices serie Tyler}}{100} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

TABLA 5.14 SERIE TAMICES AGREGADOS FINOS

Tamices módulo de finura	
Tamiz	Abertura (mm)
3/8	9,50
N°4	4,75
N°8	2,36
N°16	1,18
N°30	0,6
N°50	0,3
N°100	0,15

Fuente: Luna, G., (2014). Estudio del hormigón. Quito - Ecuador

Luego de haber realizado el ensayo se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

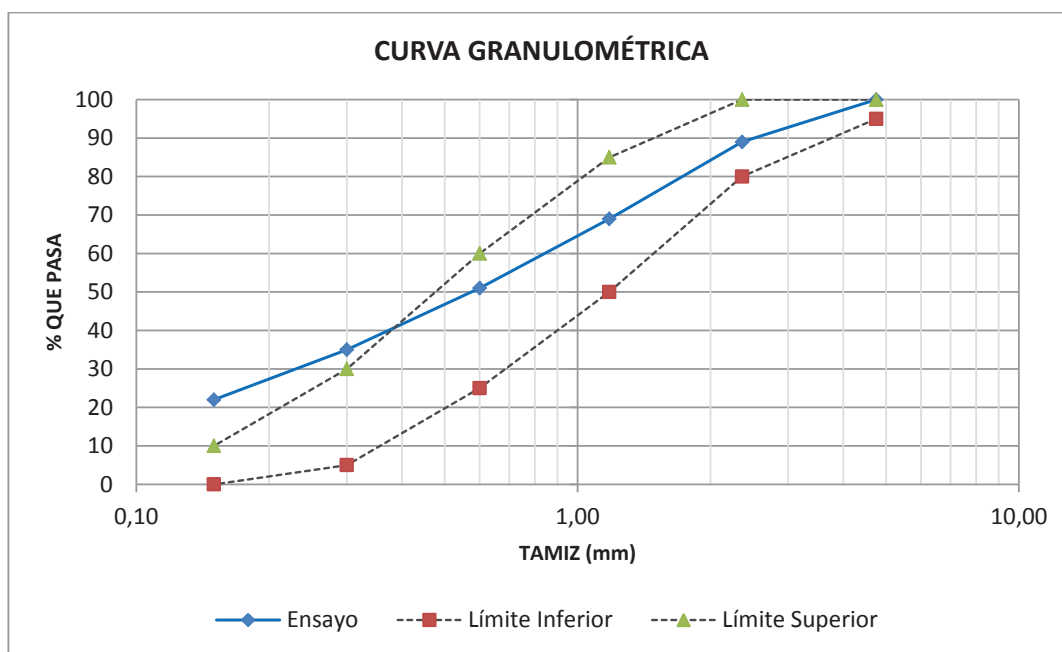
TABLA 5.15 RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO

Norma Inen 872							
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (gr)	Peso Retenido Acum. (gr)	% Retenido Acum.	% Que Pasa	Mín.	Máx.
4	4,75	2,00	2,00	0	100	95	100
8	2,36	115,50	117,50	11	89	80	100
16	1,18	200,80	318,30	31	69	50	85
30	0,60	175,80	494,10	49	51	25	60
50	0,30	161,40	655,50	65	35	5	30
100	0,15	127,10	782,60	78	22	0	10
BAND.		217,40	1000,00	100	0		
Σ:		1000,00					

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

W_{MUESTRA}: 1.000 g
% Pérdida: 0,00% < 3,0% O.K
Módulo de Finura (MF): 2,34

FIGURA 5.19 CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO FINO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.2.2. Peso Específico y Absorción

El peso específico o gravedad específica ayuda a determinar las proporciones, en peso y volumen, del agregado que se ocupará en una mezcla; de la misma manera, el porcentaje de absorción permitirá establecer la cantidad de agua que se requerirá en la dosificación.

Para la determinar los parámetros mencionados, se usarán los procedimientos establecidos en la norma NTE INEN 856, que por su extensión se los realizará en subprocesos:

a. Muestreo

- Obtener la muestra según lo detallado en la norma NTE INEN 695 y reducirla hasta obtener aproximadamente 1kg, siguiendo el procedimiento indicado en la norma NTE INEN 2566.

b. Preparación de la muestra

- Si es necesario, lavar el material hasta eliminar los polvos, limos, arcillas y/o materia orgánica que pudiera presentarse.
- Sumergir la muestra en agua, por 24 horas o hasta que este material llegue a su saturación.

FIGURA 5.20 MUESTRA DE ÁRIDO SUMERGIDA EN AGUA



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

c. Determinación de la condición “superficie saturada seca” SSS

- Después de transcurridas las 24 horas, verter el exceso de agua, evitando la pérdida de material fino.
- Extender la muestra sobre una bandeja no absorbente.
- Secar paulatinamente la muestra; para acelerar el proceso se la puede colocar en el horno o exponerla a aire caliente, en cualquiera de los métodos y con ayuda de una espátula moverla constantemente para obtener un secado uniforme.
- Continuar con esta operación hasta que la muestra se aproxime a una condición de flujo libre, es decir, que las partículas de los agregados no se adhieran entre sí marcadamente por efecto de la tensión superficial del agua.

FIGURA 5.21 LAVADO DE LA MUESTRA Y EQUIPO PARA CONDICIÓN SSS



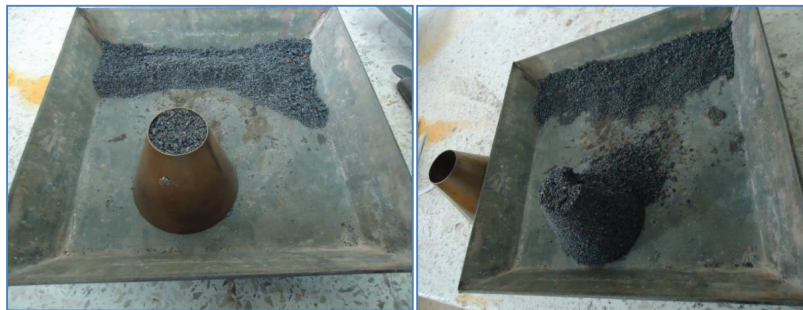
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

d. Determinación la humedad superficial (Condición SSS).

- Colocar el molde sobre una superficie lisa no absorbente.
- Llenar el molde con el material hasta que se desborde y apilar material adicional por encima del borde superior.
- Sosteniendo firmemente el molde, consolidar el agregado con 25 golpes ligeros del compactador, dejándolo caer libremente desde una altura de más o menos 5 mm sobre la superficie del árido.
- Ajustar la altura de la cual debe caer el compactador después de cada golpe y distribuirlos por toda la superficie.

- Limpiar el material derramado alrededor de la base del molde y levantarlo verticalmente, evitando inducir vibraciones. El agregado habrá llegado a su condición SSS cuando al levantar el cono tiene un desplome leve.
- Si al levantar el cono el material conserva la forma del molde hay que continuar secando y repetir el proceso (**d**) hasta que el árido alcance su condición SSS.

FIGURA 5.22 DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN SSS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

e. Determinación de densidades

- Llenar el picnómetro de agua hasta la marca de aforo, determinar y anotar su peso y temperatura.
- Una vez que se obtiene el agregado en condición SSS, pesar 500 gr.
- En el mismo picnómetro vacío, con ayuda del embudo introducir los 500 gr de arena en SSS y adicionar agua hasta aproximadamente un 90% de su capacidad.
- Eliminar las burbujas de aire atrapado en la muestra más agua, ya sea, por agitación manual del picnómetro, o aplicándole vacío por medio de una bomba.
- Inmediatamente después de eliminar todas las burbujas de aire, llenar de agua hasta la marca de aforo evitando introducir aire, y si es necesario corregir la temperatura del agua y arena en el picnómetro a aproximadamente $23,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Luego de pesar el picnómetro con agua y arena, vaciar el árido fino en un recipiente previamente pesado.
- Poner a secar en el horno a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Finalmente, luego de 24 horas sacar del horno el recipiente con la muestra seca, dejar enfriar por alrededor de una hora, y pesar.

FIGURA 5.23 PROCEDIMIENTO GRAVIMÉTRICO PARA GRAVEDADES ESPECÍFICAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Las fórmulas utilizadas para los respectivos cálculos son las siguientes:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SH): } \frac{A}{B+S-C} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS): } \frac{S}{B+S-C} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS): } \frac{A}{B+A-C} \quad (\text{Ec. 5.15})$$

$$\text{Absorción, \%: } \frac{S-A}{A} * 100 \quad (\text{Ec. 5.16})$$

Donde,

A: Peso del material seco.

B: Peso del picnómetro + agua

C: Peso del picnómetro + agua + material.

S: Peso del material en S.S.S.

Los resultados obtenidos del promedio de dos ensayos, son los que se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 5.16 RESULTADOS DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN
AGREGADO FINO

DENSIDAD RELATIVA (Gravedad Específica)	
Densidad relativa(gravedad específica) (SH):	$\frac{A}{B + S - C} = 2,45 \text{ gr/cm}^3$
Densidad relativa(gravedad específica) (SSS):	$\frac{S}{B + S - C} = 2,56 \text{ gr/cm}^3$
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS):	$\frac{A}{B + A - C} = 2,75 \text{ gr/cm}^3$
Absorción:	$\frac{S - A}{A} * 100 = 4,54 \%$

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.2.3. Densidades Aparentes

Para realizar un buen diseño de hormigón, es necesario conocer el peso de los áridos secos que se necesita para llenar un recipiente de volumen y pesos conocidos. Este parámetro es importante porque ayuda a determinar el volumen suelto de un agregado dentro de una mezcla, al quedar confinado dentro de una masa de hormigón compactado.

5.2.2.3.1 Densidad aparente suelta

Se determina al relacionar el peso de un material vertido en un recipiente estándar, de diámetro, altura y peso conocidos, sin necesidad de ningún tipo de compactación o vibración.

Este procedimiento al igual que para el agregado grueso, se regirá según lo indica la norma NTE INEN 858 (Ver apartado 5.2.1.3.1), la única diferencia en este proceso radica en que para agregado fino, es suficiente utilizar un recipiente de 9 litros de capacidad.

FIGURA 5.24 PROCESO DE LLENADO DEL MOLDE CON EL AGREGADO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.2.3.2 Densidad aparente compactada.

Se define como la cantidad de agregado requerida para llenar un volumen unitario, cuando ésta es compactada según indica la norma NTE INEN 858, procedimiento que es el mismo que se ejecuta para agregado grueso (Ver apartado 5.2.1.3.2); al igual que en el apartado anterior, se utilizará un molde de 9 litros de capacidad.

FIGURA 5.25 PROCESO DE LLENADO Y COMPACTADO DEL AGREGADO FINO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

En la siguiente tabla se muestran los resultados promedio, de dos ensayos consecutivos realizados para la determinación de las densidades aparentes del agregado fino. Se recalca que los cálculos para la determinación de estos parámetros han sido realizados con las mismas expresiones utilizadas para densidades aparentes de agregado grueso:

TABLA 5.17 RESULTADOS DE DENSIDADES APARENTES AGREGADO FINO

DENSIDAD SUELTA			
PRUEBA N°	unidad	1	2
MOLDE N°		LP-60-066	LP-60-066
Diámetro ϕ	cm	20,25	20,25
Altura h	cm	29,10	29,10
Peso Molde(P1)	kg	4,90	4,90
Peso Molde + Agregado Suelto (P2)	kg	19,60	19,90
Volumen molde (V)	lt	9,37	9,37
Densidad Aparente Suelta	g/cm ³	1,57	1,60
DENSIDAD PROMEDIO	kg/m ³	1584,10	
DENSIDAD COMPACTADA			
PRUEBA N°	unidad	1	2
MOLDE N°		LP-60-066	LP-60-066
Diámetro ϕ	cm	20,25	20,25
Altura h	cm	29,10	29,10
Peso Molde(P1)	kg	4,90	4,90
Peso Molde + Agregado Compactado (P2)	kg	21,00	21,10
Volumen molde (V)	lt	9,37	9,37
Densidad Aparente Compactada	g/cm ³	1,72	1,73
DENSIDAD PROMEDIO	kg/m ³	1722,81	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.2.4. Contenido orgánico en arena

Un requisito importante que debe cumplir un agregado fino es que debe estar libre de impurezas orgánicas. Esto debido a que la materia orgánica, si se encuentra en cantidades excesivas en el material, causa un retardo en las reacciones químicas de hidratación del cemento durante el tiempo de fraguado, y consecuentemente afecta el desarrollo de la resistencia y en su durabilidad.

Se considera materia orgánica a los tejidos animales y/o vegetales que fueron formados por carbono, nitrógeno y agua, apareciendo en las arenas en forma de humus o arcilla orgánica. Para determinar si un agregado fino tiene una cantidad tolerable de impurezas orgánicas, se empleará el método de colorimetría detallado en la norma NTE INEN 855.

En resumen, la prueba consiste en previamente diluir tres partes en masa del reactivo hidróxido de sodio en 97 partes de agua. Se debe obtener una muestra de aproximadamente 450 gramos de material. Luego, con un embudo, introducir

en una botella de vidrio, normalizada, todo el material o hasta los 130 ml y añadir la solución de hidróxido de sodio, hasta que el volumen del agregado fino y del líquido sean aproximadamente 200 ml. Cerrar la botella, agitar vigorosamente y dejar en reposo durante 24 horas, luego de las cuales definir el color del líquido sobrenadante de la muestra de ensayo con ayuda del comparador de color normalizado de la escala de Gardner (Tabla 5.18).

FIGURA 5.26 MEZCLA DE LA SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 5.27 MEZCLA DEL REACTIVO CON LA MUESTRA



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 5.18 PLACA ORGÁNICA DE COLORES GARDNER

Color normalizado escala de Gardner No.	Número de orden en el comparador
5	1
8	2
11	3(Estándar)
14	4
16	5

NOTA. Se debe utilizar el procedimiento de comparación, excepto que se debe reportar el número del vidrio del comparador que es más cercano al color del líquido que sobrenada sobre la muestra de ensayo. Cuando se utiliza este procedimiento, no es necesario preparar la solución de color normalizado.

Fuente: NTE INEN 855

Cuando la muestra produce un color igual o más oscuro del color N°3 del comparador, se considera que el material contiene impurezas orgánicas perjudiciales, y la arena no se considera apta para la fabricación de hormigones.

FIGURA 5.28 MEZCLA DEL REACTIVO Y AGREGADO EN REPOSO A LAS 24 HORAS.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 5.19 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO ORGÁNICO DEL AGREGADO FINO.

CONTENIDO ORGÁNICO ACEPTABLE:	SÍ: <input checked="" type="checkbox"/>	NO: <input type="checkbox"/>			
COLOR ESCALA GARDNER:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.3. CEMENTO

El cemento es sin duda el componente más influyente en la fabricación de toda clase de hormigones y en particular en H.A.R., por tal razón se debe tener cuidado en la selección y en la determinación de sus características y propiedades físico-mecánicas.

Al combinar el cemento con el agua se forma una pasta de cemento, cuya función principal es cubrir toda la superficie de los agregados gruesos y finos para aglutinarlos, además de llenar los vacíos existentes entre ellos.

El valor de la densidad del cemento se emplea principalmente para calcular los pesos y volúmenes en una mezcla, esta característica está relacionada con la calidad y grado de contaminación del mismo, por lo que se deben realizar los ensayos correspondientes, para garantizar dicha condición.

5.2.3.1. Densidad Real

El peso específico o densidad real del cemento se define como la relación entre el peso y volumen que ocupan las partículas sin considerar el aire que existe entre ellas. Este valor se encuentra alrededor de 3.10 gr/cm^3 , para Cemento Portland puro. La determinación del valor de la densidad se lo realizará mediante el método del Frasco de Le Chatelier, que se encuentra descrito en la Norma NTE INEN 156; y que se detalla a continuación:

Introducir una cantidad suficiente de reactivo, gasolina o kerosene, en el frasco de tal manera que no sobrepase el nivel del cuello inferior entre las marcas 0 cm^3 y 1 cm^3 , sumergir el frasco en forma vertical en agua para evitar variaciones de temperatura mayores a $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y tomar las primeras lecturas de volumen y peso inicial.

Pesar 64 gramos de cemento e introducirlos al frasco, evitando salpicaduras y que éste se adhiera a las paredes interiores sobre el nivel del líquido. Después de que todo el cemento esté dentro, colocar el tapón en el frasco y hacerlo rodar

sobre una superficie lisa en posición inclinada, con el fin de eliminar el aire atrapado, luego someter el frasco a baño María hasta alcanzar la temperatura de las lecturas iniciales, y tomar las lecturas de volumen y peso del frasco con el reactivo y cemento. La expresión utilizada para el cálculo de la densidad real del cemento mediante el frasco de Le Chatelier es la siguiente:

$$D_{real} = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Donde,

D_{real} : Densidad real, gr/cm³

P_1 : Peso inicial del frasco + reactivo, gr

P_2 : Peso final del frasco + reactivo + cemento, gr

L_1 : Lectura de volumen inicial (sin cemento), cm³

L_2 : Lectura de volumen final (con cemento), cm³

$(L_2 - L_1)$, corresponde al volumen de sólido sumergido.

FIGURA 5.29 PROCESO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL DEL CEMENTO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 5.20 RESULTADOS DEL ENSAYO DENSIDAD REAL PARA EL CEMENTO SELVALEGRE TIPO IP.

DENSIDAD REAL			
PRUEBA N°	1	2	3
FRASCO N°	3154	SM14/24	3184
Lectura Inicial (cm ³)	0,55	0,20	0,10
Lectura final (cm ³)	21,19	21,00	20,50
Peso inicial(frasco+gasolina) (gr)	322,50	312,70	324,20
Peso final (gr)	385,90	375,70	387,30
Desnidad Real (gr/cm ³)	3,07	3,03	3,09
DENSIDAD REAL PROMEDIO	3,06 grs./cm³		

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.3.2. Densidades Aparentes

Como ya es de conocimiento general la densidad se define como la relación de masa sobre volumen, en el caso del cemento es el peso de las partículas de cemento por unidad de volumen, esta propiedad puede variar significativamente dependiendo del nivel de conservación y almacenamiento que se le proporcione, por esta razón se hace relevante el cálculo de la densidad suelta y compactada.

5.2.3.2.1. Densidad Suelta

Al igual que en los agregados o en cualquier material, la densidad suelta del cemento relaciona el peso y volumen que ocupa en un recipiente de dimensiones y peso conocidos, pero sin aplicar sobre el material ningún tipo de compactación o vibración. El procedimiento a seguir es el siguiente:

Pesar y dimensionar el diámetro y altura del molde, con ayuda de una espátula llenar el molde hasta que desborde la superficie superior; con la misma espátula enrasar el recipiente evitando producir vibraciones. Limpiar cemento derramado en el exterior del molde y determinar el peso del recipiente con el cemento.

FIGURA 5.30 PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD SUELTA DEL CEMENTO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La densidad suelta se determina con la siguiente expresión:

$$\gamma_{cs} = \frac{4(P_2 - P_1)}{\pi \phi^2 h} \text{ [gr/cm}^3\text{]} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

Donde,

γ_{cs} = Densidad suelta del cemento, gr/cm³

W_{CS} = Peso del cemento suelto = $(P_2 - P_1)$, gr

P_1 = Peso del molde vacío, gr

P_2 = Peso del molde + cemento en estado suelto, gr

ϕ = Diámetro del molde, cm

h = Altura del molde, cm

5.2.3.2.2. Densidad Compactada

Se define igual que la densidad suelta con la única diferencia que en la densidad compactada, al momento de llenar el molde, el material debe ser apisonado.

Para determinar la densidad compactada se debe pesar y dimensionar el diámetro y altura del molde, con la espátula introducir cemento hasta la tercera parte del molde, llevar el molde aproximadamente 2 cm de altura y dejar caer por 25 ocasiones. Seguir introduciendo material hasta el segundo tercio del molde y dejar caer por 25 ocasiones más, para el tercer tercio proceder a llenar hasta que

el cemento colme el recipiente y dejar caer por 25 veces más. Finalmente enrasar el recipiente, limpiar los excesos y pesar el molde más el cemento compactado.

FIGURA 5.31 - PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD COMPACTADA DEL CEMENTO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La densidad compactada se determina con la siguiente expresión:

$$\gamma_{cc} = \frac{4(P_2 - P_1)}{\pi \phi^2 h} \text{ [gr/cm}^3\text{]} \quad (\text{Ec. 5.19})$$

Donde,

γ_{cc} = Densidad compactada del cemento, gr/cm³

W_{cc} = Peso del cemento compactado = $(P_2 - P_1)$, gr

P_1 = Peso del molde vacío, gr

P_2 = Peso del molde + cemento compactado, gr

ϕ = Diámetro del molde, cm

h = Altura del molde. cm

En la siguiente tabla se muestran los resultados de dos ensayos consecutivos para determinar la Densidad suelta y compactada del Cemento Selvalegre Tipo IP:

TABLA 5.21 – RESULTADOS DEL ENSAYO DENSIDADES APARENTES PARA EL CEMENTO.

DENSIDAD SUELTA		
PRUEBA N°	1	2
MOLDE N°	1	3
Diámetro (cm)	5,50	5,50
Altura (cm)	14,85	14,90
Peso Molde(P1) (gr)	153,15	152,40
Peso Molde + Muestra(P2) (gr)	511,40	515,60
Volumen (cm ³)	352,81	354,00
Peso Muestra (kg)	358,25	363,20
Desnidad Suelta (gr/cm ³)	1,015	1,026
DENSIDAD SUELTA PROMEDIO	1,02 grs./cm3	
DENSIDAD COMPACTADA		
PRUEBA N°	1	2
MOLDE N°	1	3
Diámetro (cm)	5,50	5,50
Altura (cm)	15,00	14,90
Peso Molde(P1) (gr)	153,15	152,40
Peso Molde + Muestra(P2) (gr)	596,70	597,70
Volumen (cm ³)	356,37	354,00
Peso Muestra (kg)	443,55	445,30
Desnidad Suelta (gr/cm ³)	1,245	1,258
DENSIDAD COMPACTADA PROMEDIO	1,25 grs./cm3	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.3.3. Consistencia Normal

Al momento que el cemento entra en contacto con el agua se forma un agente de enlace denominado “pasta”, el cual tiene la función de aglutinar los agregados.

Cuando el agua agregada a una cantidad de cemento hace que se hidraten todas las partículas del cemento y llegue a un óptimo estado de fluidez se dice que se ha obtenido su Consistencia Normal; esta cantidad de agua es expresada como porcentaje del peso del cemento.

Esta propiedad es de gran importancia para un buen diseño de hormigones, especialmente cuando lo que se busca es reducir la relación a/c para obtener un H.A.R., sin afectar a la completa hidratación, debido a que con el incremento de la

cantidad de agua, la fluidez de la pasta aumenta pero la resistencia a compresión disminuye.

FIGURA 5.32 EQUIPO Y MATERIALES PARA CONSISTENCIA NORMAL



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

El ensayo para determinar la consistencia normal del cemento, por el método Vicat, se encuentra detallado en la Norma NTE INEN 157 y se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, en 30 segundos, de la varilla del aparato Vicat. Y consiste en los siguientes procedimientos:

a. Preparación de la pasta, que se lo realiza como lo describe la norma NTE INEN 155:

- Pesar 500 gr del cemento.
- Pesar la cantidad de agua estimada, alrededor del 23% al 26% del peso del cemento.
- Con una franela húmeda limpiar el tazón y paletas de la mezcladora planetaria, luego colocarlas en posición de mezclado. La mezcladora debe estar fija y lista en un lugar libre de vibraciones.
- Colocar toda el agua en el tazón de la mezcladora.

- Añadir el cemento al tazón y dejar reposar 30 segundos, para que el cemento absorba el agua.
- Inmediatamente después de pasado el tiempo de reposo, encender la mezcladora a velocidad baja y mezclar por 30 segundos.
- Detener la mezcladora por 15 segundos, tiempo en el cual, con la ayuda de una espátula, se debe empujar hacia abajo toda la pasta que se haya adherido a las paredes del tazón.
- Encender la mezcladora y mezclar por 60 segundos más, a velocidad media.

FIGURA 5.33 PREPARACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

b. Moldeo de las muestras de ensayo

- Inmediatamente después que se haya terminado la preparación de la pasta, con las manos enguantadas, formar una bola con la mezcla, separar las manos aproximadamente 150 mm y lanzar la bola de pasta, por seis ocasiones, de una mano a la otra. Si la masa se muestra muy pegajosa o muy seca se debe repetir la preparación de la pasta variando la cantidad de agua empleada.
- Cuando se ha logrado una masa de forma aproximadamente esférica, tomar con una mano un molde tronco cónico, previamente engrasado, y con la otra la bola de masa e insertarla presionándola en el molde por la parte ancha, hasta que se llene completamente.

- Con la palma de la mano retirar el exceso en la parte ancha, colocar el molde sobre una placa de acrílico o vidrio. Con ayuda de una espátula cortar todo el exceso de pasta que sobresale el molde y alisar la superficie, si fuera necesario, evitando no comprimir la pasta.

c. Determinación de la consistencia

- Colocar lo más centrada posible la pasta confinada en el anillo, sobre la placa del aparato Vicat, bajar la sonda Tetmayer hasta que se ponga en ligero contacto con el borde superior del molde y ajustar en esta posición. Ubicar el indicador móvil en la marca cero y ajustarlo. Soltar la sonda Tetmayer 30 segundos después de la preparación de la pasta, si la sonda penetra en la pasta 10 ± 1 mm en 30 segundos, se puede decir que se ha llegado a la consistencia normal. De no ser así, repetir la preparación de la pasta y el moldeo de las muestras variando los porcentajes de agua hasta lograr el objetivo de penetración.

FIGURA 5.34 DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Para expresar la consistencia normal en porcentaje se utiliza la siguiente ecuación:

$$C(\%) = \frac{M_a}{M_c} * 100 \quad (\text{Ec. 5.20})$$

Dónde:

C (%)= Consistencia normal, en %

Ma= Peso del agua, en gr.

Mc= Peso del cemento, en gr.

Los resultados del ensayo se detallan en la siguiente tabla:

TABLA 5.22 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO.

CONSISTENCIA NORMAL	
PESO DE CEMENTO (gr)	650
PESO DE AGUA (gr)	188
TEMPERATURA AGUA (°C)	17
CONSISTENCIA a/c (%)	28,9
PENETRACIÓN (mm)	9,9

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.2.3.4. Tiempos de Fraguado

A medida que las partículas de cemento se hidratan en contacto con el agua la mezcla va desarrollando un paulatino endurecimiento. Cuando pierde notablemente su plasticidad y se torna difícil de manejar se puede decir que ha llegado al estado de fraguado inicial; y cuando se aprecia que ha perdido totalmente su plasticidad se puede decir que ha llegado al estado de fraguado final. El lapso de tiempo que la mezcla necesita para pasar del estado fluido al sólido se denomina tiempo de fraguado.

Esta propiedad se vuelve importante cuando se requiere conocer los tiempos de que se dispone desde el momento en el que se fabrica el hormigón hasta cuando se dé el fraguado inicial, el cual determina el lapso de tiempo en el que el hormigón fresco puede ser mezclado, transportado, colocado y compactado adecuadamente.

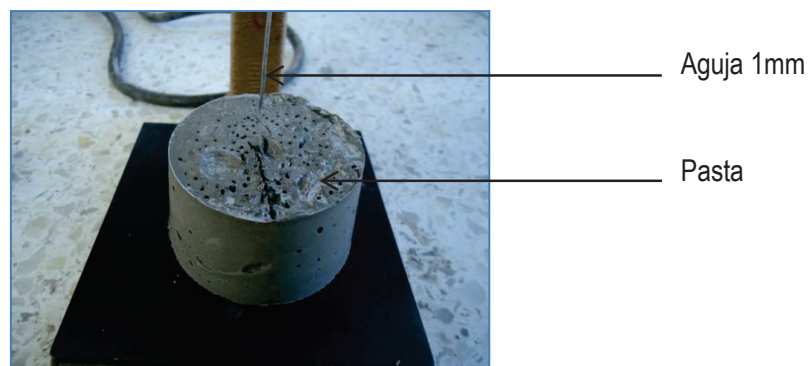
En la práctica, el fraguado empieza cuando la aguja de Vicat penetra 10 mm en 30 segundos y finaliza cuando la pasta se vuelve indeformable, con una resistencia suficiente para soportar su propio peso.

Para determinar esta propiedad, empleando el aparato de Vicat y partiendo de una pasta en consistencia normal, se usan las Normas NTE INEN 157 y NTE INEN 158; se procede como se detalla a continuación:

Una vez obtenida una pasta en su consistencia normal. Se lleva el molde con la pasta a la cámara de humedad o de curado donde permanecerá durante todo el ensayo, sacándola únicamente para colocarla en el aparato de Vicat modificado para tomar las respectivas lecturas en los tiempos establecidos. La primera lectura se la realizará trascurridos de 45 a 60 minutos de haber logrado la consistencia normal, luego cada 10 y 5 minutos hasta obtener una penetración de 10 mm en 30 segundos, que marca el tiempo inicial de fraguado. En las 4 horas siguientes, tomar lecturas cada media hora y 45 minutos hasta cuando se vaya llegando al tiempo de fraguado final. Se habrá finalizado el fraguado cuando al dejar caer la aguja de Vicat no deje una huella circular completa y perceptible en la superficie de la muestra.

En todos los tiempos indicados se deben tomar lecturas de la penetración de la aguja Vicat, datos con los cuales se puede proponer la Curva de Fraguado (tiempo versus penetración).

FIGURA 5.35 PENETRACIÓN AGUJA DE VICAT MODIFICADO



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Los resultados que se obtuvieron del ensayo de Tiempo de Fraguado para el Cemento Selvalegre son los siguientes:

TABLA 5.23 RESULTADOS DEL ENSAYO TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO.

Tiempo inicial de Fraguado (h:min)	1:00
Tiempo final de Fraguado (h:min)	6:08

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Una vez conocidas las características de los agregados y cemento, se diseña la mezcla con las propiedades de trabajabilidad y características de resistencia requeridas. Además de la posterior realización de pruebas de control de calidad en el hormigón, y comprobación de los resultados esperados. Etapa que ya fue descrita en el Capítulo 4.

5.3.1. PROBETAS CILÍNDRICAS

Generalmente, para determinar que el hormigón llega a la resistencia para la que fue diseñada, se realizan pruebas de control de laboratorio siendo indispensable fabricar probetas de hormigón cilíndricas, las cuales deben ser elaboradas en moldes normalizados bajo la norma ASTM C 47. Esta norma específica que para obtener resultados confiables en los diferentes ensayos, los moldes cilíndricos deberán ser indeformables, no absorbentes y estancos durante su uso. La altura del molde debe ser igual a dos veces el diámetro, el que a su vez, debe ser por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del árido grueso.

FIGURA 5.36 MOLDES CILÍNDRICOS PARA PROBETAS DE HORMIGÓN.

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Para el ensayo de rotura por compresión, la norma específica que las probetas deben ser cilíndricas, moldeadas y curadas en posición vertical y que los moldes estandarizados para este requerimiento son los de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura o de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura. Ya que en el presente proyecto se utiliza un agregado con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (1/2 plg.), se utilizarán moldes de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura.

FIGURA 5.37 MOLDE CILÍNDRICO DE 100 mm DE DIÁMETRO

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.3.2. VIGUETAS.

Las probetas para la determinación de la Rotura a Flexotracción y la Resistencia a Cortante, tienen que ser moldeadas y curadas en forma horizontal, los moldes para fundir estas vigas deben cumplir con los mismos requisitos de materiales que

para moldes cilíndricos y bajo la norma ASTM C 47. En cuanto a las dimensiones, la longitud debe ser 50 mm mayor que tres veces la dimensión de su altura, la relación entre el ancho y el alto no debe excede el 1.5.

La menor dimensión entre el ancho y alto de la viga debe ser por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso, bajo estas condiciones y con un tamaño máximo de agregado de 12.5 mm (1/2 plg.), las vigas que se elaboraron para esta investigación, corresponden a las siguientes dimensiones: 100 x 100 x 400 mm.

5.3.3. MOLDEO DE ESPECÍMENES

Los moldes deben ser untados con una ligera película de aceite mineral, para evitar que el hormigón se adhiera a ellos, además éstos deben estar sobre una superficie rígida y nivelada, libre de vibraciones o perturbaciones, como medidas previas al moldeo de las probetas, según la NTE INEN 1576. La recolección de las muestras de hormigón en obra, se debe realizar como indica la norma NTE INEN 1763, que puedan ser aplicables a los trabajos de laboratorio.

Como paso inicial en el control del hormigón y antes de la preparación de las probetas, se debe medir y registrar el asentamiento, contenido de aire y temperatura de cada parada, según las normas NTE INEN 1578, NTE INEN 1252 y NTE INEN 3562 respectivamente.

FIGURA 5.38 MUESTRA OBTENIDA DE UNA PARADA



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Una vez que se han obtenido las propiedades antes mencionadas, con ayuda de una pala se debe homogenizar la muestra antes de proseguir con el moldeo.

Para cilindros de 100 mm de diámetro y vigas de sección transversal de 100x100 mm, el llenado se lo debe realizar en dos capas, cada una debidamente compactada.

Para hormigones con asentamientos menores a 5 cm, y que se aplica a este caso de estudio, se utiliza el método de compactación por vibración, procedimiento que viene dado como sigue:

Con una pala pequeña o cucharón tomar la muestra de hormigón y verterla alrededor del perímetro de la abertura del molde, de tal manera que asegure una distribución uniforme, que se minimice la segregación y procurando no derramarlo, hasta que la mezcla cubra aproximadamente algo más de la mitad del molde; se coloca el molde en la mesa vibratoria, ajustar la velocidad de vibración con la que se compactará, cada capa será vibrada hasta cuando la superficie del hormigón quede relativamente lisa y empiecen a salir burbujas de aire, pero sin llegar a la segregación, en cada capa vibrada golpear suavemente las paredes del molde con el mazo de goma por lo menos por 10 veces para eliminar las burbujas de aire que han podido quedar atrapadas, en la segunda capa se debe agregar una cantidad suficiente de hormigón de tal manera que después de la compactación se mantenga lleno.

Después de la compactación de la última capa, con una llana retirar el exceso de hormigón, y con una regla enrasar al nivel del borde superior del molde hasta dejar la superficie lo suficientemente lisa y plana para que cumpla con las tolerancias que exige la norma. Todas las operaciones, desde la preparación de la muestra hasta el moldeo de probetas, no excederán un lapso de 15 minutos.

FIGURA 5.39 MOLDEO DE PROBETAS EN FORMA DE VIGAS

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Para terminar con el proceso de moldeo, se deben llevar las probetas moldeadas a un lugar con condiciones adecuadas por un tiempo mínimo de 24 horas, evitando las perturbaciones, las vibraciones y la pérdida de humedad hasta que sean desencofrados para su respectivo curado.

5.3.4. CURADO DE LOS PROBETAS

El curado es el proceso, descrito en la norma NTE INEN 1576, mediante el cual el hormigón hidráulico desarrolla sus propiedades mecánicas, tales como resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, entre otras, mediante la conservación de las condiciones de humedad y temperatura del hormigón, garantizando así una buena hidratación del cemento, y como consecuencia, mejora la adherencia entre la pasta y los agregados. Para un hormigón de alta resistencia este proceso resulta de vital importancia, ya que va estrechamente relacionado con la resistencia a la compresión, por ende, un curado insuficiente puede causar problemas de retracción o fisuración.

5.3.4.1. Curado Inicial

Inmediatamente después del moldeo de cilindros o vigas, las probetas deben ser almacenadas en un lugar con temperaturas controladas que oscilen entre 20 °C y 26 °C, para hormigones de alta resistencia, protegiéndolas de la luz directa del sol o de climas extremos, evitando la pérdida de humedad. Así se podrán obtener

resultados más confiables, tal como menciona la norma indicada en el párrafo anterior; los resultados de ensayos de resistencia a edades tempranas pueden ser menores cuando son almacenados a 16 °C o menos, y más altos cuando se los almacena a 27 °C o más. Para edades mayores, los resultados de los ensayos pueden ser menores para especímenes almacenados en temperaturas iniciales altas.

FIGURA 5.40 CURADO INICIAL DE LAS PROBETAS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.3.4.2. Curado final

Transcurridas, según exige la norma, como máximo 48 ± 4 horas del curado inicial, se debe desencofrar las probetas. En los 30 minutos siguientes de la remoción de los moldes, evitando cualquier tipo de vibración o golpe en las probetas, se las deben marcar con un código de identificación en la cara que permanecerá visible, y sumergirlas en una piscina de curado que cumpla con la norma NTE INEN 2528 respecto a las cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón, con agua a una temperatura de $20 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$.

En este proyecto de investigación se procuró mantener una temperatura de curado de 17°C, con el objetivo de mantener condiciones reales de trabajo en obra, ya que la temperatura media en Quito, oscila alrededor de este valor. Sin embargo se han realizado mezclas adicionales con un control de temperatura de

23 °C como exige la norma, de forma que se pueda evaluar la diferencia entre estas condiciones de curado.

FIGURA 5.41 - MARCADO Y CURADO FINAL DE LAS PROBETAS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.3.5. NÚMERO DE ESPECÍMENES

Al tratarse de una investigación, se busca que el hormigón en todas sus mezclas sea lo más homogéneo posible, sin embargo, éste, al depender de un sin número de variables como características de los componentes y condiciones ambientales hace que el diseño sea diferentes en cada mezcla, razón por la cual, se hace indispensable un correcto control de regularidad de la producción.

El número de probetas realizadas es independiente de la forma de la probeta, se recomienda que para cada edad de ensayo se elaboren por lo menos dos probetas, sin embargo, en esta investigación, se realizarán como mínimo tres especímenes para cada edad de ensayo y para cada mezcla de H.A.R. con y sin adición de fibra.

5.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL H.A.R.

El emplear fibras en materiales frágiles, como lo es el hormigón de Alta Resistencia, es una alternativa que se ha venido desarrollando desde los años

70s, como opción para mejorar la resistencia a la tracción, la capacidad de controlar la fisuración y la absorción de energía durante la rotura.

En este capítulo se especifican ensayos normalizados para hormigones con y sin adición de fibra, realizados en esta investigación con el objetivo de evaluar y cuantificar la influencia de las fibras sobre el comportamiento mecánico del hormigón.

Todas las tablas de cálculo y gráficas correspondientes a cada ensayo se encuentran en el Capítulo 6.

5.4.1. ROTURA POR COMPRESIÓN

Este ensayo es sin duda el más requerido en cualquier tipo de hormigón para controlar el crecimiento de la resistencia a través del tiempo, y determinar la aceptación o rechazo del diseño de ese hormigón.

Para el caso de hormigones con adiciones de fibras, el procedimiento de este ensayo se encuentra detallado en la norma UNE 83507 que difiere de la NTE INEN 1573, que corresponde a hormigones convencionales, únicamente en la velocidad de carga; para esta prueba mecánica se utilizarán probetas cilíndricas de hormigón de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura, como se había mencionado anteriormente; el proceso se resume a continuación:

Sacar las probetas de la condición de curado al que fueron sometidos, procurando no perder humedad hasta el momento del ensayo. Posteriormente se retira cualquier humedad superficial que se encuentre en la probeta con ayuda de una toalla o dejándola airear por unos minutos. Los especímenes deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles que se muestran en la Tabla 5.24.

TABLA 5.24 TOLERANCIA DE TIEMPO ADMISIBLE PARA EL ENSAYO DE ESPECÍMENES

Edad de Ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	$\pm 0,5$ h o 2,1%
3 días	2 horas o 2,8%
7 días	6 horas o 3,6%
28 días	20 horas o 3,0%
90 días	2 días o 2,2%

Fuente: NTE INEN 1573

FIGURA 5.42 PROBETAS ANTES DEL ENSAYO ROTURA POR COMPRESIÓN



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Luego se debe dimensionar y pesar, para verificar si cumplen con las condiciones de regularidad en su superficie que las normas antes mencionadas exigen, de no ser así, deberán ser refrentados los cilindros según la norma UNE 83506 o ASTM C 617. El diámetro de las probetas se determinará como el promedio de dos mediciones perpendiculares entre si alrededor de la sección.

Una vez que la probeta cumpla con todas las especificaciones antes mencionadas, se coloca cuidadosamente centrada en el plato inferior de la máquina de ensayo, llevar el plato superior hasta que se apoye en la cara superior de la probeta, girar suavemente con la mano el plato móvil hasta que se efectúe un asiento uniforme.

A continuación, se aplicará la carga de forma continua y sin variaciones bruscas que ocasionen cargas de impacto, la velocidad de aplicación de carga será de $0.5 \pm 0.2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ ($5.1 \pm 2 \text{ Kg/cm}^2/\text{s}$). La carga se aplicará hasta que la probeta llegue a su carga última, que es cuando la máquina de ensayo se detiene automáticamente.

FIGURA 5.43 RESUMEN FOTOGRÁFICO DEL PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO ROTURA POR COMPRESIÓN



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La resistencia a la compresión de los especímenes, que es lo que se obtiene como resultado final de este ensayo, se determina dividiendo la carga de rotura soportada por la probeta cilíndrica para el área de la sección transversal, como se expresa a continuación.

$$F'_c = \frac{\text{Carga de rotura}}{\text{Área transversal de la probeta}} \quad (\text{Ec. 5.21})$$

Dónde:

F'_c = Resistencia a compresión, kg/cm^2

Carga de rotura expresada en kg

Área transversal de la probeta, cm^2

Para probetas de hormigón con relación altura/diámetro inferior a 2, se aplican los factores de corrección que se indican en la Tabla 5.25, los valores de relaciones que no se encuentren en la tabla se pueden calcular por interpolación.

TABLA 5.25 FACTOR DE CORRECCIÓN SEGÚN LA RELACIÓN DE LONGITUD AL DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN.

Relación entre la altura y el diámetro	Coefficiente de corrección
2	1
1,75	0,98
1,5	0,96
1,25	0,94
1,1	0,90

Fuente: Norma Española UNE 83507.

FIGURA 5.44 PROBETAS DE HORMIGÓN CON Y SIN FIBRA DESPUÉS DEL ENSAYO ROTURA POR COMPRESIÓN



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.4.2. ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

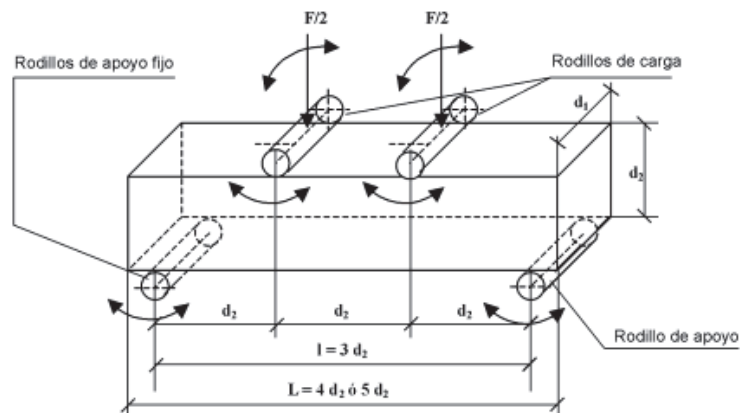
Este ensayo busca determinar la carga máxima de rotura por flexotracción en probetas prismáticas de hormigón de alta resistencia con y sin adición de fibra,

fabricados bajo la norma UNE 83504, y con referencia en la norma NTE INEN 1576.

El método de ensayo Rotura a Flexotracción se encuentra especificado en la norma Española UNE 83509, la cual indica el proceso de carga al cual tienen que ser sometidas las probetas simplemente apoyadas hasta llegar a su carga máxima, bajo la aplicación de fuerzas en los dos tercios de la luz de la viga, mediante elementos de transmisión que aseguren que estas se apliquen perpendicularmente a la cara de la probeta.

El mecanismo de aplicación de carga, se puede observar en la Figura 5.45 y consiste en dos rodillos para apoyo de la probeta y dos rodillos para la aplicación de la carga; los rodillos deben ser fabricados de acero, tener una sección circular con un diámetro de 20 ± 1 mm y una longitud superior en 10 mm a la anchura de la probeta a ensayar. Los rodillos superiores se los coloca a una distancia d_2 , mientras que los rodillos inferiores se colocan a una distancia $3 d_2$, siendo d_2 la dimensión menor de la probeta (altura), en este caso 100 mm, y dejando una distancia libre de 50 mm en cada extremo.

FIGURA 5.45 MECANISMO DE APLICACIÓN DE CARGAS PARA EL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN



Fuente: Norma Española UNE 83509

Las probetas no deben perder humedad antes del ensayo, por lo que deben ser ensayadas antes de tres horas de haber sido sacadas del proceso de curado, se puede minimizar este efecto al cubrir las probetas con toallas húmedas.

FIGURA 5.46 PROBETAS IDENTIFICADAS ANTES DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Antes de empezar con el ensayo se debe comprobar las dimensiones de las probetas a ser utilizadas, para esto se determina la longitud L , y se marcan los puntos de apoyo que sostendrán la probeta durante el ensayo y las secciones de aplicación de carga, luego se debe determinar y registrar las dimensiones laterales de las secciones transversales, las cuales deben ser medidas en cada plano de apoyo y otra en el plano central, además comprobar la luz entre apoyos.

FIGURA 5.47 ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN EN CURSO

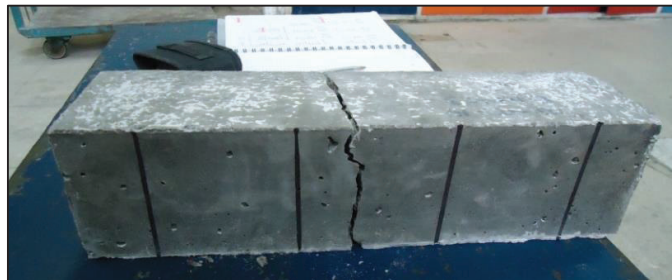


Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Las probetas se colocan sobre los apoyos manteniendo su posición de moldeo y los rodillos de carga en contacto con la superficie de la probeta. El contacto entre los rodillos y la superficie debe ser total, en caso contrario, según indica la norma antes mencionada, se deben colocar tiras de cuero, corcho o cartón de aproximadamente 6 mm de espesor, entre la superficie de la probeta y los rodillos.

Una vez colocada y ajustada la probeta en la prensa, se aplica la carga de manera uniforme a una velocidad constante entre 0.80 N/mm²/min (8.2 Kg/cm²/min) y 1.20 N/mm²/min (12.2 Kg/cm²/min). Se debe considerar que al trabajar con hormigones que tengan adición de fibra se puede producir fisuramientos aún sin haber alcanzado su carga máxima o de rotura total, por tanto, se debe continuar con el ensayo hasta que se produzca el colapso.

FIGURA 5.48 PROBETA DESPUÉS DEL ENSAYO ROTURA A FLEXOTRACCIÓN CON LA ROTURA EN EL CENTRO MEDIO.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

El ensayo se considerará aceptable cuando la rotura se presente en la cara sujeta a tracción pura, es decir, dentro del tercio medio; la tensión de rotura se calculará con la siguiente expresión:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (\text{Ec. 5.22})$$

Donde,

f_{cf} : Tensión de rotura por flexotracción, en Kg/cm²

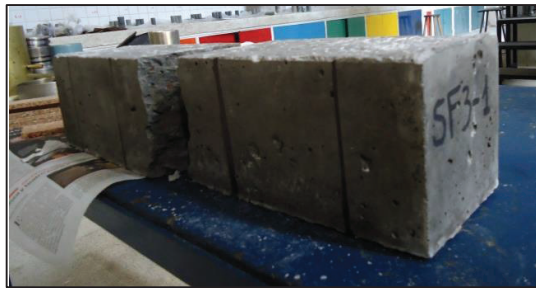
F : Carga de rotura entre apoyos, en cm.

l : Luz entre apoyos, en cm.

d_1 : Ancho medio de la probeta, en cm.

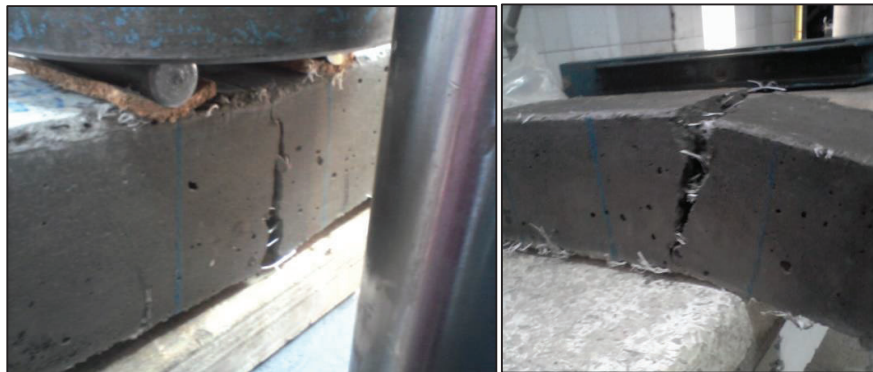
d_2 : Altura media de la probeta, en cm.

FIGURA 5.49 PROBETA DE HORMIGÓN SIN FIBRA DESPUÉS DE SER ENSAYADA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 5.50 PROBETAS DE HORMIGÓN CON FIBRA DESPUÉS DE SER ENSAYADAS



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

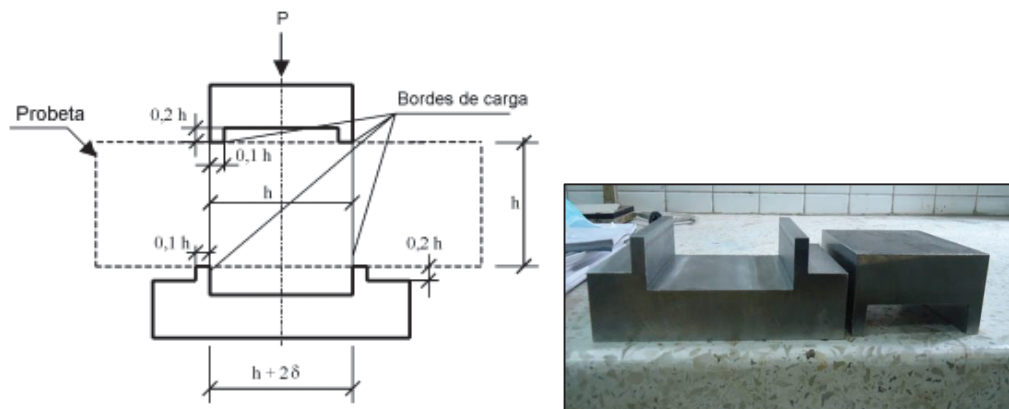
5.4.3. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE

Este ensayo determina la resistencia a esfuerzo cortante del H.A.R mediante corte directo doble, se basa en el procedimiento especificado en la Norma UNE

83511, el cual indica el tratamiento previo que se debe dar a la muestras para ensayarlas, las especificaciones del aparato de corte que se empleará, el método de ensayo y expresiones de cálculo.

El aparato de corte está normalizado y será tal que, a lo largo de todo el ensayo, materialice y asegure una carga perpendicular a la probeta. Las dimensiones se encuentran especificadas en la Figura 5.50 y el ancho del aparato excederá al ancho de la probeta en, al menos, 10 mm.

FIGURA 5.51 APARATO DE CORTE NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

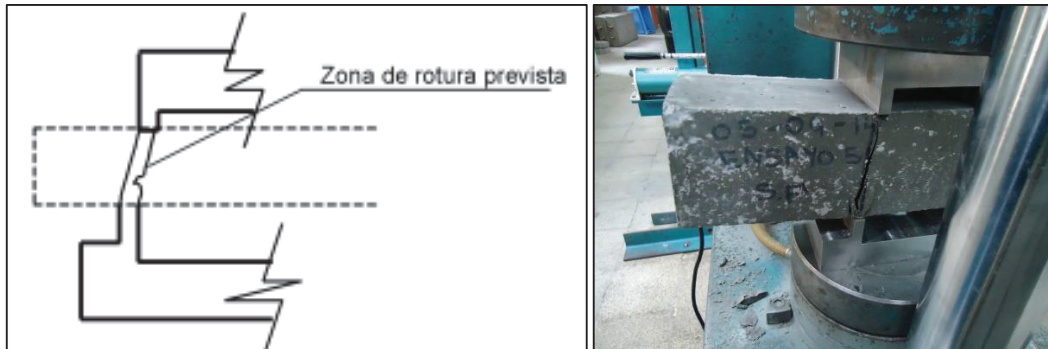


Fuente: Norma Española UNE 83511 / Fanny G., Julia P.

Las condiciones de humedad de la probeta en el momento del ensayo no deben variar significativamente respecto a las correspondientes al fin del periodo de curado. Por lo que el ensayo debe realizarse lo más rápido posible.

Antes de colocar la probeta en la máquina de ensayo, se debe determinar y registrar el ancho y altura de las dos secciones previstas para la rotura. Una vez dimensionada, se coloca el conjunto de probeta y aparato de corte lo más centrado posible en la máquina de ensayo, con las caras laterales que han permanecido verticales durante su fabricación como cara superior e inferior, de no ser así los ensayos se considerarán nulos ya que, la carga se aplicada producirá planos de rotura fuera de la zona inicialmente prevista.

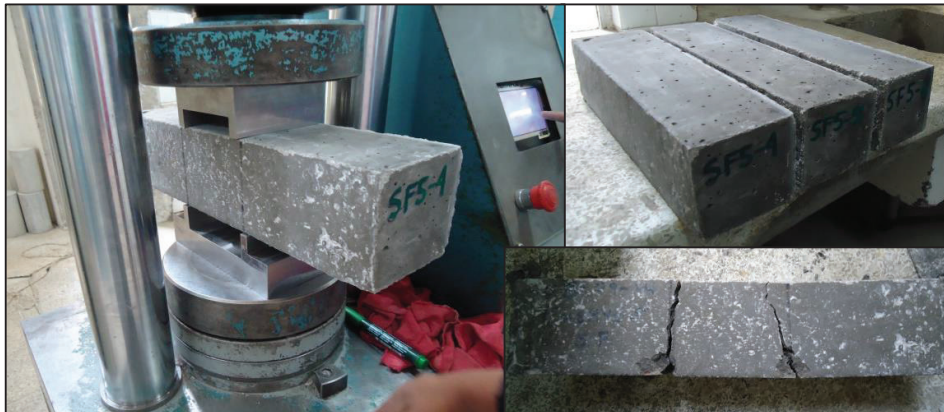
FIGURA 5.52 COLOCACIÓN CORRECTA DE CABEZALES PARA OBTENER LA FALLA EN LA ZONA DE ROTURA PREVISTA.



Fuente: Norma Española UNE 83511 / Fanny G., Julia P.

La carga debe ser aplicada sin impactos y de forma continua, a una velocidad que produzca un incremento de la tensión tangencial de corte comprendido entre 0.06 N/mm²/s (0.6 Kg/cm²/s) y 0.10 N/mm²/s (1.0 Kg/cm²/s).

FIGURA 5.53 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

La resistencia a esfuerzo cortante será el valor promedio de al menos dos resultados, y se calculará, mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{P}{2bh} \quad (\text{Ec. 5.23})$$

Donde,

τ : Resistencia a cortante, kg/cm^2

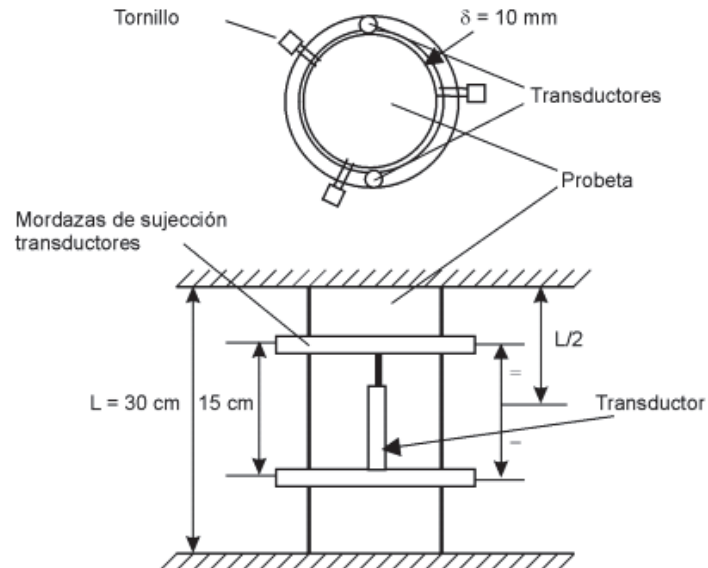
P : Carga máxima alcanzada, kg

b, h : Dimensiones de la probeta, cm

5.4.4. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN

Uno de los métodos para determinar la Tenacidad a Compresión Simple de los hormigones reforzados con fibras, se realiza por medio del procedimiento descrito en la norma española UNE 83508, el cual especifica que se debe registrar el desplazamiento axial de la probeta, por medio de transductores de desplazamiento montados sobre ella, colocados como se indica en la Figura 5.53.

FIGURA 5.54 ESQUEMA DE MEDIDA DE DEFORMACIÓN.



Fuente: Norma Española UNE 83508.

Para el presente estudio se emplearon probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, las cuales resultaron muy pequeñas para el transductor con el que

se cuenta en el Laboratorio, que es exclusivo para cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, por tal razón se intenta adaptarlo , como se muestra en la Figura 5.54, pero a pesar de todos los esfuerzos no se consigue que el sistema cuente con la estabilidad suficiente para determinar correctamente las deformaciones, por esta razón se procede a utilizar un método alternativo, y más confiable, para obtener datos de las deformaciones axiales; este método se basa en la implantación de Galgas Extensométricas o Strain Gauges (en inglés) en el eje axial de las probetas.

FIGURA 5.55 ESQUEMA DE LOS ACOPLES DE LOS ANILLOS Y DEFORMÍMETRO ADAPTADO A CILINDROS DE 100 X 200 mm.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Una vez solucionado el primer inconveniente surge otro, la limitación que tiene la máquina de ensayo a compresión, que proporciona datos de carga únicamente hasta que la probeta llega a su capacidad máxima, es decir que la lectura de carga se detiene automáticamente aunque el sistema hidráulico siga aplicando carga al espécimen, por lo que no proporciona la información necesaria para la realización de la curva esfuerzo-deformación más allá de la rotura. A pesar de todos los inconvenientes se decide realizar este ensayo colocando un Strain Gage en el eje axial de la probeta y obtener un valor de tenacidad con el área bajo la

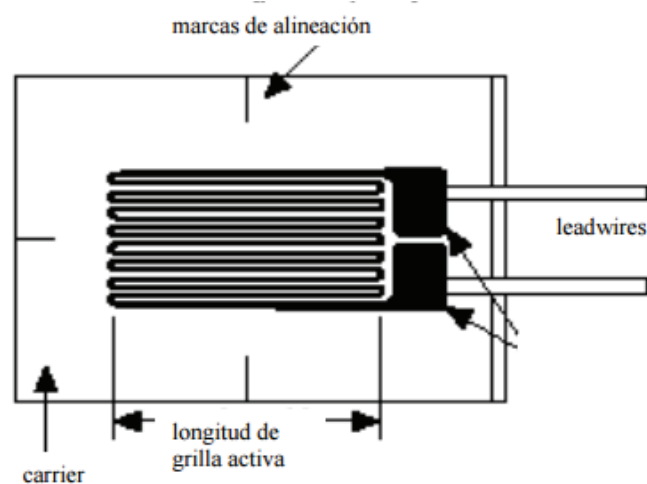
curva esfuerzo-deformación obtenido únicamente hasta la carga máxima a la que llegan las probetas.

5.4.4.1. Galgas Extensométricas

Es un dispositivo electrónico de medida universal, que determina cuantitativamente deformaciones por medio de cambio de longitud del dispositivo al aplicar a la probeta una carga axial. Las magnitudes son adimensionales pero al ser cantidades muy pequeñas de deformación unitaria expresada en mm/mm, se suele reportar como microstrain $\mu\epsilon$, que es $\epsilon \times 10^{-6}$, siendo ϵ la deformación unitaria.

El strain gauge metálico consiste en un cable muy fino dispuesto en forma de grilla o serpentín, que está pegada a un fino respaldo llamado "carrier", el cual está sujeto directamente a la probeta a ser ensayada. Por lo tanto, el esfuerzo que sufre la probeta se transfiere directamente al strain gauge, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica, según expresa en Ing. Javier Sosa en su trabajo final, Galgas Extensiométricas.

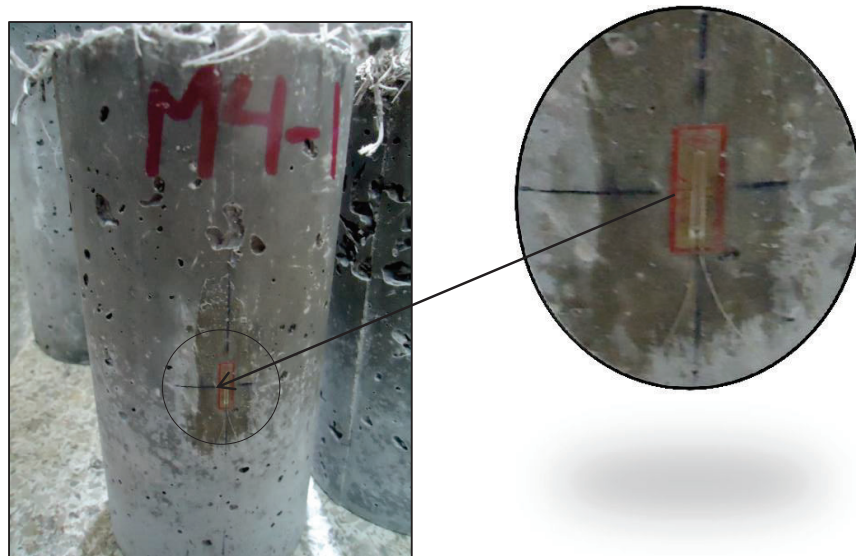
FIGURA 5.56 ESQUEMA DE UN STRAIN GAGE METÁLICO



Fuente: Sosa, J., Disponible en http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf

El procedimiento para este ensayo es el mismo que se sigue para el ensayo rotura por compresión, con la diferencia que a la probeta se le instala un strain gauge en el eje axial, el cual al ser conectado a un Puente de Wheatstone proporciona lecturas de deformación para cada nivel de carga axial aplicada; y con estos datos se genera la curva Esfuerzo - Deformación Axial. Luego, utilizando el método de integración numérica de Simpson se determinan las áreas aproximadas bajo las curvas, valor que se define como la tenacidad que se desea conocer.

FIGURA 5.57 AMPLIACIÓN DE STRAIN GAGE COLOCADO EN EL EJE AXIAL.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

5.4.5. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

El Módulo de Elasticidad del concreto, es la propiedad mecánica que indica la rigidez o resistencia a la deformación elástica de un material, su estudio sirve como parámetro para determinar las deformaciones, cambios de forma y tamaño que se presentan en el hormigón al aplicarle esfuerzos compresivos.

La obtención del módulo de Elasticidad se realiza en base a la norma ASTM C 469. El ensayo, según la norma, consiste en aplicar una serie de tres ciclos de

carga y descarga, es decir que la carga axial que se aplique a la probeta, durante el primer ciclo corresponda al 40% de la carga total obtenida en la prueba del Ensayo Rotura por Compresión, de forma que se asegure que la probeta no falle antes que se cumplan los tres ciclos; la carga máxima alcanzada en cada ciclo se debe realizar en una relación 2 a 1 respecto al ciclo anterior, llegando a ser la carga alcanzada en el tercer ciclo la carga última de ese hormigón, con estos datos se generan tres curvas Esfuerzo – Deformación, correspondientes a los tres ciclos.

De la gráfica obtenida con los tres ciclos de carga y descarga se selecciona la curva que mayor estabilidad y consistencia presente para la determinación del módulo, de forma gráfica.

FIGURA 5.58 MONTAJE DE LA PROBETA PARA EL ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se presentan las tablas de resultados obtenidos de la realización de los ensayos en especímenes cilíndricos como son: Determinación de la Resistencia a Compresión, Determinación del Módulo de Elasticidad, Determinación de la Tenacidad a Compresión; también, en especímenes prismáticos, de la Determinación de la Resistencia a Flexotracción y Determinación de la Resistencia a Cortante.

Los resultados corresponden a los valores obtenidos de ensayos realizados a edades de 3, 7, 14 y 28 días. Sin embargo, es importante acotar que se ha procedido a realizar ensayos a compresión en probetas cilíndricas, a edades superiores a los 100 días, con el fin de obtener datos del crecimiento de la resistencia a compresión en este tipo de hormigones.

Todas las tablas han sido elaboradas con los valores obtenidos de cada ensayo, sin embargo han sido procesados, de forma que los valores de tolerancia del error que se presentan entre ensayos estén dentro de aquellos establecidos en las normas: NTE INEN 1573, NTE INEN 2554, ASTM C469/C469 M-14, apartado de Precisión.

Se presentan, además, los valores promedio de los resultados alcanzados para cada una de las edades antes mencionadas; para facilitar la visualización, comprensión y evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas con cada una de las cantidades de fibra añadidas, se han generado gráficas, las cuales corresponden a las cantidades efectivamente utilizadas, esto es, 2, 5, 8 y 12 Kg/m³, calculadas con base al volumen de hormigón que se fabricó.

Es importante anotar que, para el ensayo a compresión simple de los hormigones Patrón o sin fibra, y aquellos fabricados con adiciones de fibra, se realizaron interpolaciones para las edades correspondientes de 91 y 132 días, con datos obtenidos a edades superiores a los 200 días, considerando que se mantiene un comportamiento uniforme y de manera que se pueda completar los cuadros de datos con miras a su análisis.

6.2 ENSAYO ROTURA A COMPRESIÓN

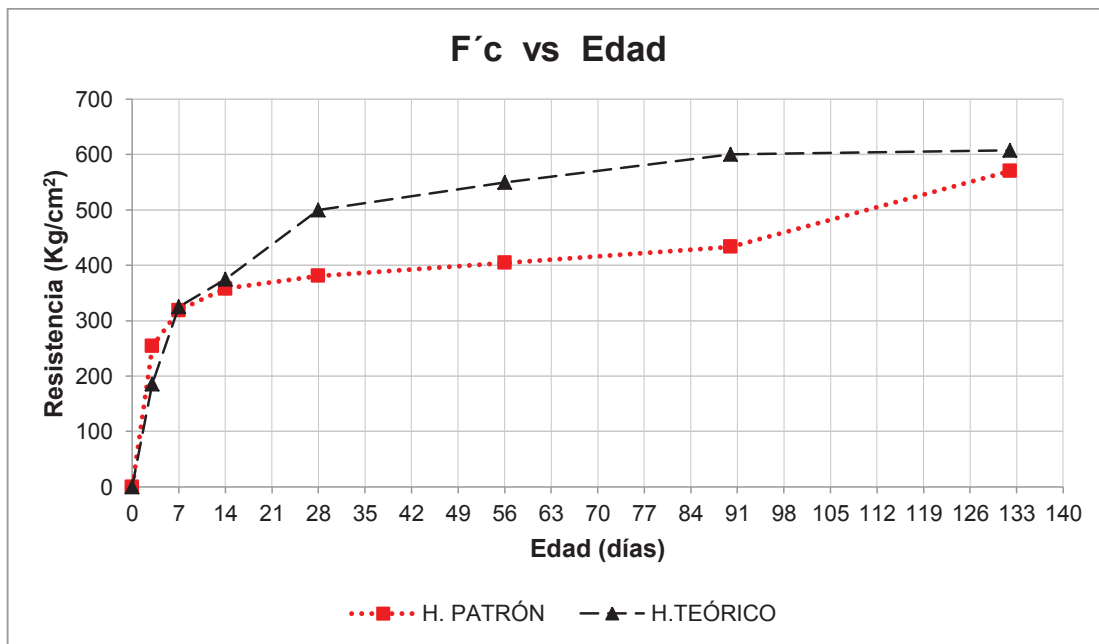
Norma Española UNE 83507

TABLA 6.1 RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA (H. PATRÓN)

Nº	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
1	SF1-1	01-sep-14	04-sep-14	3	10.2	20.1	3744.3	19.64	80.91	1626.37	2.30	242.78	254.36
2	SF1-2	01-sep-14	04-sep-14	3	10.2	20.1	3814.9	18.91	81.71	1642.43	2.32	231.38	
3	SF1-3	01-sep-14	04-sep-14	3	10.1	20.0	3716.7	21.31	80.12	1602.37	2.32	265.94	
4	SF1-4	01-sep-14	08-sep-14	7	10.1	20.1	3728.3	24.31	80.12	1606.38	2.32	303.40	318.70
5	SF1-5	01-sep-14	08-sep-14	7	10.1	20.1	3768.9	26.76	80.12	1610.38	2.34	333.99	
6	SF1-6	01-sep-14	08-sep-14	7	10.2	20.0	3777.8	18.35	81.71	1634.26	2.31	224.54	
7	SF1-7	01-sep-14	15-sep-14	14	10.2	20.2	3792.4	20.38	80.91	1634.46	2.32	251.84	358.05
8	SF1-8	01-sep-14	15-sep-14	14	10.2	20.0	3731.9	28.45	81.71	1634.26	2.28	348.16	
9	SF1-9	01-sep-14	15-sep-14	14	10.1	20.0	3744.8	29.19	79.33	1582.58	2.37	367.93	
10	SF1-10	01-sep-14	29-sep-14	28	10.1	20.1	3761.6	31.45	79.33	1590.51	2.37	396.51	380.97
11	SF1-11	01-sep-14	29-sep-14	28	10.1	20.0	3772.8	29.28	80.12	1602.37	2.35	365.42	
12	SF1-12	01-sep-14	29-sep-14	28	10.2	20.2	3859.0	25.40	81.71	1646.51	2.34	310.80	
13	SF1-13	01-sep-14	27-oct-14	56	10.2	20.1	3745.6	32.54	81.71	1642.43	2.28	398.24	404.59
14	SF1-14	01-sep-14	27-oct-14	56	10.2	20.0	3762.0	33.25	80.91	1618.27	2.32	410.94	
15	SF1-15	01-sep-14	27-oct-14	56	10.1	20.1	3366.6	23.44	80.12	1606.38	2.10	292.54	
16	SF1-16	01-sep-14	11-ene-15	132	10.1	20.1	3756.5	45.69	80.12	1610.38	2.33	570.33	570.33
17	SF1-17	01-sep-14	11-ene-15	132	10.2	20.0	3746.9	41.56	81.71	1634.26	2.29	508.65	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.1 CURVA DE DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA (H. PATRÓN).



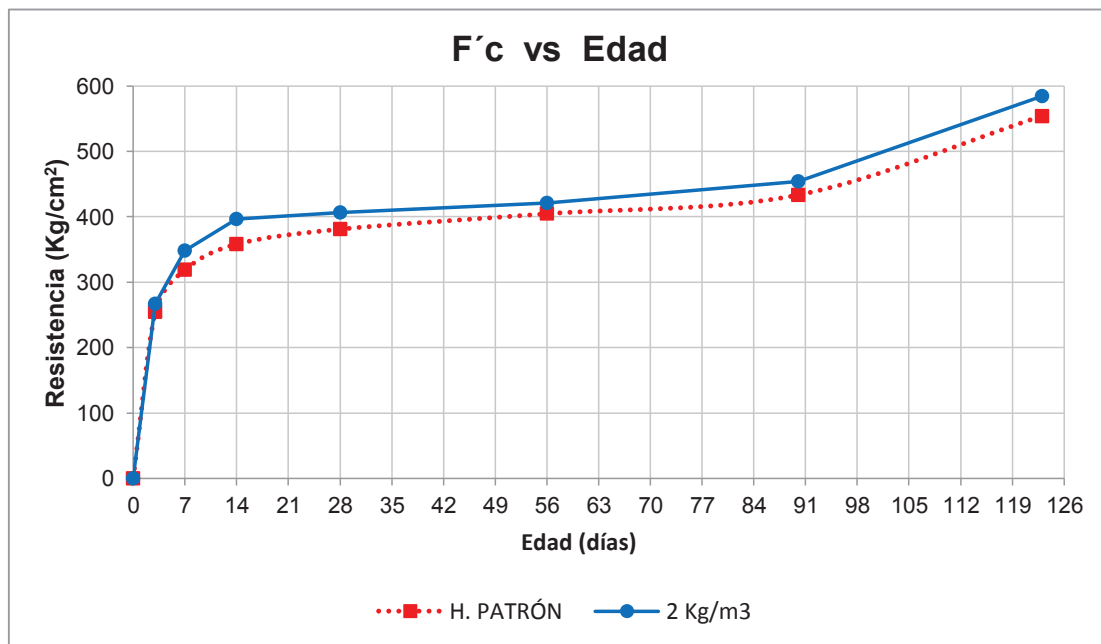
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.2 - RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA CON TASA DE 2kg/m³

FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
04-ago-14	3	10.1	20.1	3797.4	20.10	80.12	1610.38	2.36	250.84	267.09
04-ago-14	3	10.2	19.9	3804.5	22.20	81.71	1626.09	2.34	271.70	
04-ago-14	3	10.2	20.0	3829.6	22.55	80.91	1614.23	2.37	278.74	
08-ago-14	7	10.1	20.0	3784.1	25.57	79.33	1586.54	2.39	322.30	348.44
08-ago-14	7	10.2	20.1	3847.5	24.66	81.71	1638.34	2.35	301.78	
08-ago-14	7	10.1	20.1	3774.8	29.71	79.33	1594.48	2.37	374.58	
15-ago-14	14	10.2	20.1	3881.2	29.33	81.71	1642.43	2.36	358.90	396.20
15-ago-14	14	10.1	20.1	3862.6	32.59	80.12	1610.38	2.40	406.81	
15-ago-14	14	10.1	20.0	3766.2	30.89	80.12	1602.37	2.35	385.59	
29-ago-14	28	10.2	20.0	3876.7	33.26	81.71	1634.26	2.37	407.01	406.78
29-ago-14	28	10.0	20.1	3812.1	32.59	78.54	1578.65	2.41	414.99	
29-ago-14	28	10.1	20.1	3827.4	31.60	79.33	1594.48	2.40	398.34	
26-sep-14	56	10.0	20.2	3825.50	34.34	78.54	1586.50	2.41	437.23	420.69
26-sep-14	56	10.0	20.0	3820.00	33.24	78.54	1570.80	2.43	423.24	
26-sep-14	56	10.0	19.9	3762.00	31.54	78.54	1562.94	2.41	401.61	
02-dic-14	123	10.1	21.2	3779.50	46.79	80.12	1694.51	2.23	584.00	584.00

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.2 CURVA DE DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE 2 kg/m³ DE FIBRA.



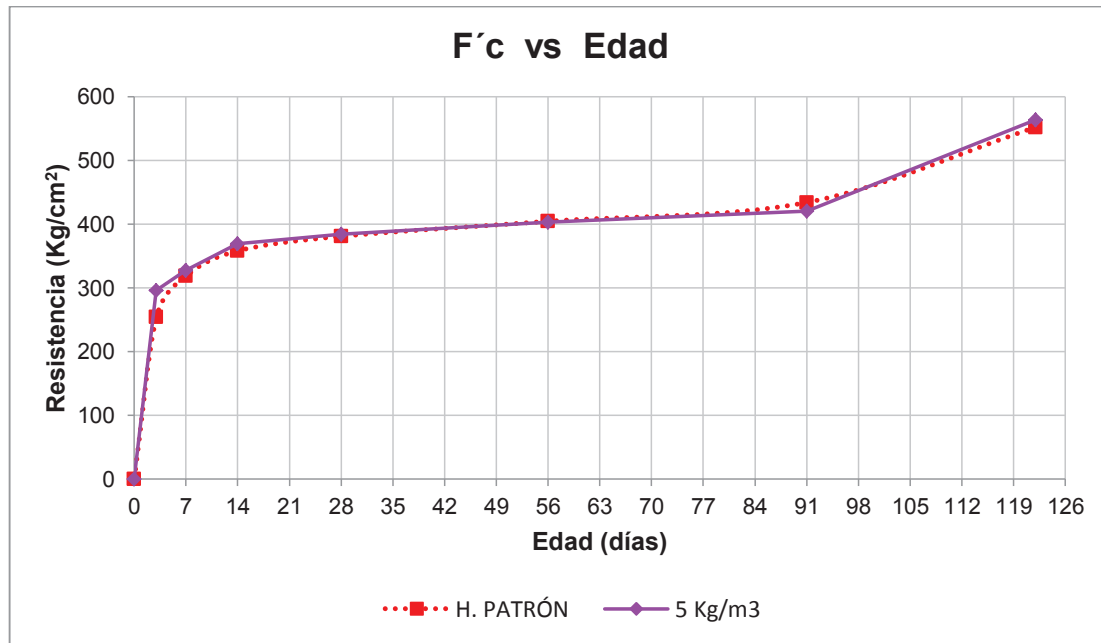
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.3 - RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA CON TASA 5kg/m³

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD (días)	φ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
1	E12-1	14-ago-14	16-ago-14	2	10.1	20.1	3767.0	26.00	79.33	1594.48	2.36	327.81	296.40
2	E12-2	14-ago-14	16-ago-14	2	10.1	19.9	3756.7	23.45	80.12	1594.36	2.36	292.73	
3	E12-3	14-ago-14	16-ago-14	2	10.1	20.0	3722.0	24.04	80.12	1602.37	2.32	300.07	
4	E12-4	14-ago-14	21-ago-14	7	10.1	20.1	3747.6	26.26	79.33	1594.48	2.35	331.01	327.28
5	E12-5	14-ago-14	21-ago-14	7	10.1	20.2	3811.5	24.95	80.12	1614.39	2.36	311.43	
6	E12-6	14-ago-14	21-ago-14	7	10.1	20.1	3736.7	27.19	80.12	1610.38	2.32	339.40	
7	E12-7	14-ago-14	28-ago-14	14	10.0	20.1	3760.1	26.77	78.54	1574.72	2.39	340.81	369.73
8	E12-8	14-ago-14	28-ago-14	14	10.1	20.2	3776.2	30.53	80.12	1614.39	2.34	381.09	
9	E12-9	14-ago-14	28-ago-14	14	10.1	20.1	3787.1	30.72	79.33	1594.48	2.38	387.28	
10	E12-10	14-ago-14	11-sep-14	28	10.2	20.1	3782.9	31.13	81.71	1642.43	2.30	380.97	384.43
11	E12-11	14-ago-14	11-sep-14	28	10.1	20.1	3759.0	30.26	80.12	1610.38	2.33	377.65	
12	E12-12	14-ago-14	11-sep-14	28	10.2	20.2	3773.8	31.93	80.91	1630.41	2.31	394.66	
13	E12-13	14-ago-14	09-oct-14	56	10.1	20.1	3795.6	32.27	80.12	1610.38	2.36	402.82	402.93
14	E12-14	14-ago-14	09-oct-14	56	10.1	20.0	3772.6	32.29	80.12	1602.37	2.35	403.04	
15	E12-15	14-ago-14	13-nov-14	91	10.1	20.1	3764.2	31.76	80.12	1606.38	2.34	396.43	420.33
16	E12-16	14-ago-14	13-nov-14	91	10.1	20.1	3771.0	35.59	80.12	1610.38	2.34	444.23	
17	E12-17	14-ago-14	14-dic-14	122	10.1	20.0	3761.2	45.19	80.12	1602.37	2.35	564.09	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.3 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 5 kg/m³ DE FIBRA.



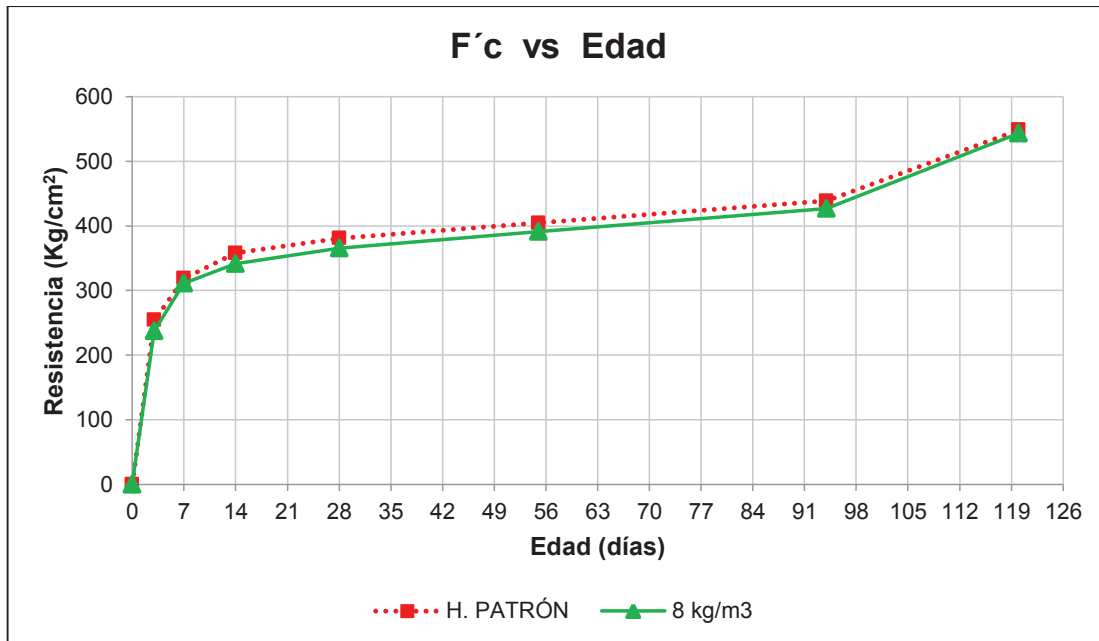
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.4 RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA CON TASA 8 kg/m³.

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
1	E13-1	15-ago-14	18-ago-14	3	10,1	20,1	3678,2	15,85	79,33	1594,48	2,31	199,83	237,55
2	E13-2	15-ago-14	18-ago-14	3	10,1	20,0	3747,5	20,40	80,12	1602,37	2,34	254,67	
3	E13-3	15-ago-14	18-ago-14	3	10,1	20,0	3706,7	20,68	80,12	1602,37	2,31	258,14	
4	E13-4	15-ago-14	22-ago-14	7	10,1	20,0	3773,5	22,58	80,12	1602,37	2,35	281,83	311,42
5	E13-5	15-ago-14	22-ago-14	7	10,1	20,1	3719,2	24,44	79,33	1594,48	2,33	308,10	
6	E13-6	15-ago-14	22-ago-14	7	10,1	20,0	3712,4	27,59	80,12	1602,37	2,32	344,32	
7	E13-7	15-ago-14	29-ago-14	14	10,1	20,1	3753,9	27,51	79,33	1594,48	2,35	346,82	341,50
8	E13-8	15-ago-14	29-ago-14	14	10,1	20,2	3772,7	27,17	80,12	1614,39	2,34	339,10	
9	E13-9	15-ago-14	29-ago-14	14	10,0	20,1	3758,1	27,01	78,54	1574,72	2,39	343,90	
10	E13-10	15-ago-14	12-sep-14	28	10,1	20,1	3738,2	30,16	80,12	1606,38	2,33	376,49	365,23
11	E13-11	15-ago-14	12-sep-14	28	10,1	20,0	3741,8	28,57	80,12	1602,37	2,34	356,60	
12	E13-12	15-ago-14	12-sep-14	28	10,2	20,1	3728,8	29,34	80,91	1622,32	2,30	362,60	
13	E13-13	15-ago-14	09-oct-14	55	10,1	20,1	3747,1	31,94	80,12	1610,38	2,33	398,61	391,06
14	E13-14	15-ago-14	09-oct-14	55	10,1	20,1	3774,1	30,73	80,12	1610,38	2,34	383,51	
15	E13-15	15-ago-14	17-nov-14	94	10,1	20,1	3750,1	33,50	80,12	1610,38	2,33	418,09	426,52
16	E13-16	15-ago-14	17-nov-14	94	10,1	20,1	3765,0	34,17	80,12	1610,38	2,34	426,52	
17	E13-17	15-ago-14	13-dic-14	120	10,2	20,2	3759,6	44,4	81,71	1650,60	2,28	543,12	543,12

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.4 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 8 KG/M³ DE FIBRA.



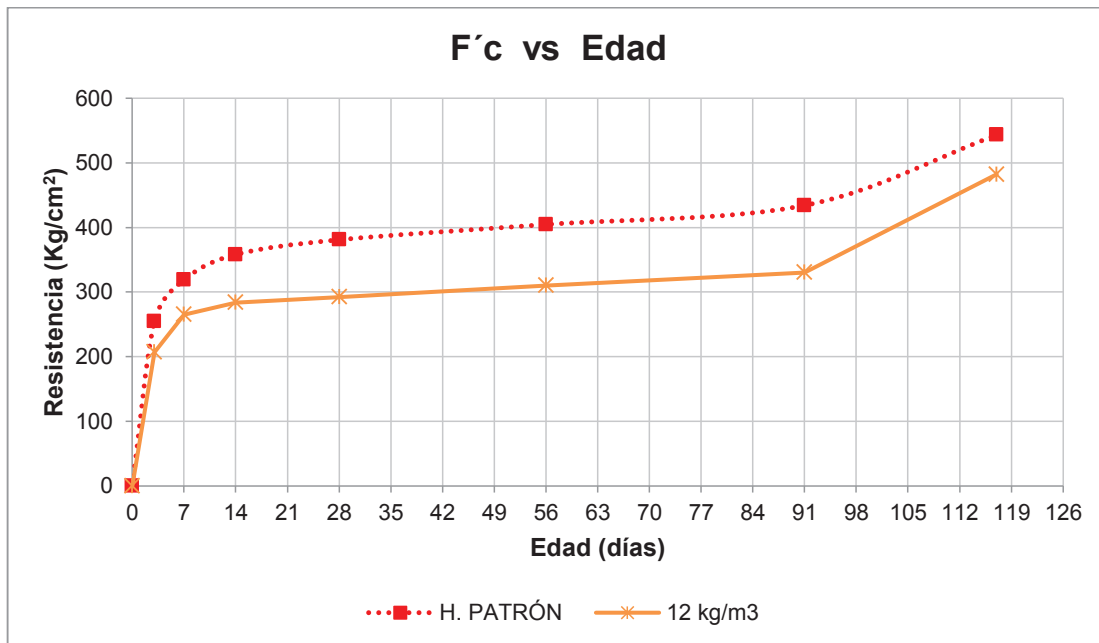
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.5 RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA CON TASA 12 kg/m³.

FECHA ENSAYO	EDAD (días)	φ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
28-ago-14	3	10.1	20.1	3610.5	15.46	80.12	1606.38	2.25	192.90	206.88
28-ago-14	3	10.1	20.1	3547.4	14.68	80.12	1610.38	2.20	183.23	
28-ago-14	3	10.1	20.1	3548.1	17.52	79.33	1594.48	2.23	220.86	
01-sep-14	7	10.1	20.1	3627.5	21.33	79.33	1594.48	2.28	268.86	265.20
01-sep-14	7	10.1	20.2	3602.0	20.95	80.12	1614.39	2.23	261.54	
01-sep-14	7	10.1	20.2	3421.6	19.10	80.12	1614.39	2.12	238.38	
08-sep-14	14	10.1	20.1	3611.4	25.17	80.12	1606.38	2.25	314.10	283.79
08-sep-14	14	10.2	20.1	3529.2	21.62	80.91	1626.37	2.17	267.15	
08-sep-14	14	10.1	20.1	3556.3	24.07	80.12	1610.38	2.21	300.43	
22-sep-14	28	10.2	20.2	3608.7	18.93	81.71	1646.51	2.19	231.71	287.18
22-sep-14	28	10.1	20.2	3706.9	22.87	80.12	1614.39	2.30	285.48	
22-sep-14	28	10.1	20.1	3603.9	23.15	80.12	1610.38	2.24	288.88	
20-oct-14	56	10.2	20.1	3603.7	24.03	80.91	1626.37	2.22	296.97	305.17
20-oct-14	56	10.1	20.2	3629.4	25.11	80.12	1618.39	2.24	313.36	
24-nov-14	91	10.0	20.1	3583.7	16.71	78.54	1578.65	2.27	212.71	315.32
24-nov-14	91	10.0	20.1	3615.5	25.81	78.54	1578.65	2.29	328.62	
24-nov-14	91	10.0	20.0	3564.7	23.72	78.54	1570.80	2.27	302.03	
20-dic-14	117	10.1	20.2	3689.6	38.62	80.12	1618.39	2.28	482.05	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.5 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 12 kg/m³ DE FIBRA.



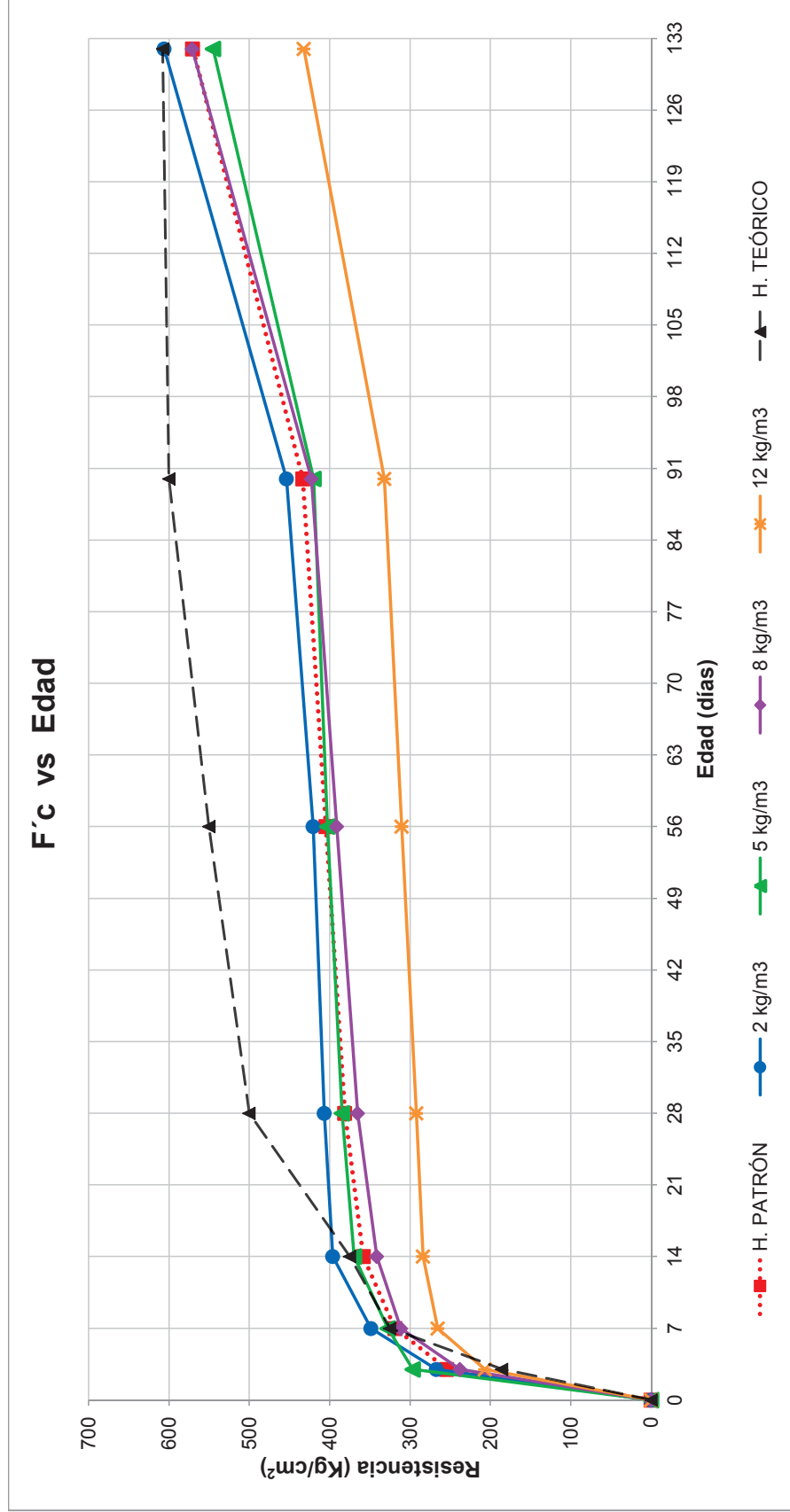
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.6 RESUMEN DE RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.

EDAD (Días)	F'c (Kg/cm ²)					
	H. TEÓRICO	H. PATRÓN	2 kg/m ³	5 kg/m ³	8 kg/m ³	12 kg/m ³
0	0	0	0	0	0	0
3	185.71	254.36	267.09	296.40	237.55	206.88
7	325.00	318.70	348.44	327.28	311.42	265.20
14	375.00	358.05	396.20	369.73	341.50	283.79
28	500.00	380.97	406.78	384.43	365.23	292.18
56	550.00	404.59	420.69	402.93	391.06	310.17
90	600.00	433.28	453.62	419.83	422.88	332.00
132	607.78	570.33	605.93	545.00	571.19	432.00

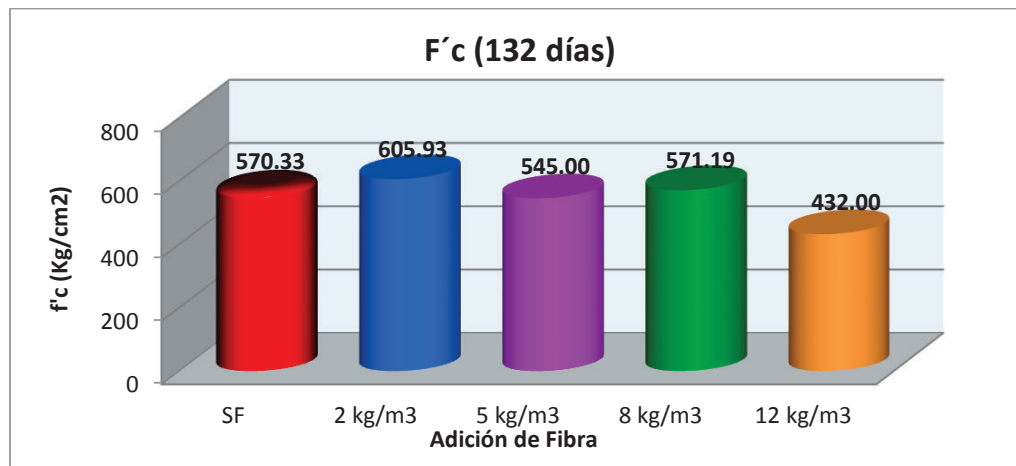
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.6 COMPARACIÓN DE LAS CURVA DE DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIN FIBRA Y CON ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.7 CURVA COMPARATIVA DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R., RESPECTO A LA ADICIÓN DE FIBRA.



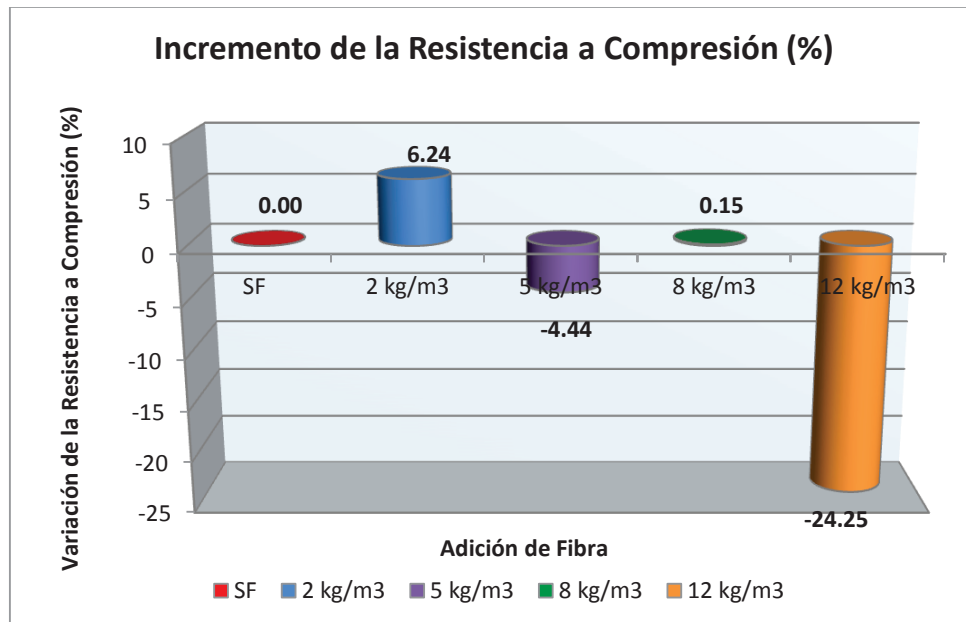
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.7 VARIACIÓN DE LOS ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL H.A.R., DEBIDA A LA ADICIÓN DE FIBRA, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

ADICIÓN DE FIBRA	F'c (Kg/cm ²)	%
SF	570,33	0,00
2 kg/m ³	605,93	6,24
5 kg/m ³	545,00	-4,44
8 kg/m ³	571,19	0,15
12 kg/m ³	432,00	-24,25

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.8 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R, EN PORCENTAJE



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6.3 DETERMINACIÓN DE LA ROTURA A FLEJO TRACCIÓN

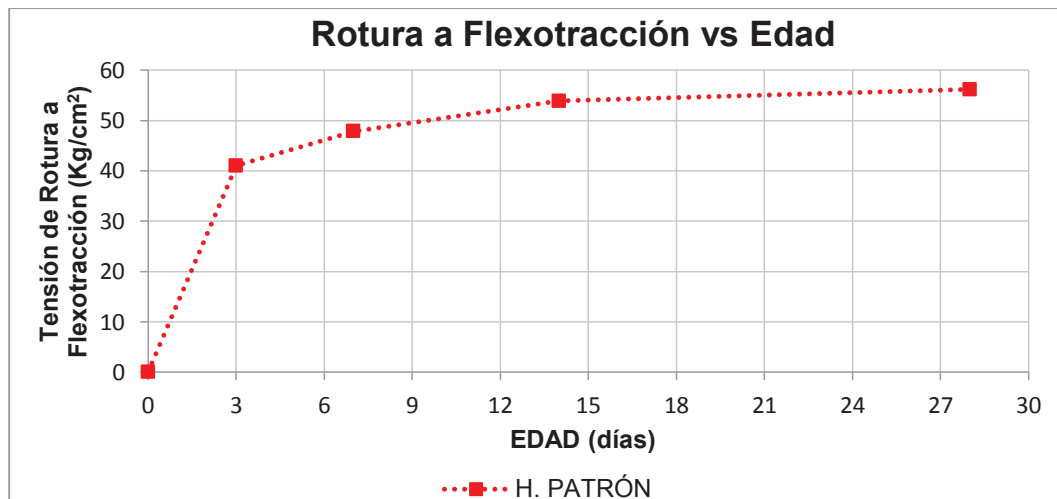
Norma Española UNE 83509

TABLA 6.8 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEJO TRACCIÓN PARA HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	LONGITUD (cm)	LUZ ENTRE APOYOS (cm)	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		f _{ef} (Kg/cm ²)	PROM. f _{ef} (Kg/cm ²)
1	SF3-1	03-sep-14	06-sep-14	3	40,2	30,05	1,435	10,2 10,1 10,2	10,2 10,3 10,2	40,70	41,02
2	SF3-2	03-sep-14	06-sep-14	3	40,15	30,1	1,422	10,1 10,2 10,2	10,1 10,1 10,1	41,34	
3	SF3-3	03-sep-14	06-sep-14	3	40,1	30,15	1,222	10,1 10,2 10,1	10,2 10,2 10,1	35,47	
4	SF3-4	03-sep-14	10-sep-14	7	40,1	30,05	1,625	10,0 10,0 10,0	10,2 10,1 10,2	47,71	47,86
5	SF3-5	03-sep-14	10-sep-14	7	40,25	30,05	1,684	10,2 10,1 10,1	10,2 10,2 10,2	48,00	
6	SF3-6	03-sep-14	10-sep-14	7	40,25	30,05	1,807	10,1 10,1 10,1	10,2 10,3 10,3	51,26	
7	SF3-7	03-sep-14	17-sep-14	14	40,15	30,25	1,873	10,1 10,1 10,1	10,2 10,2 10,2	54,36	53,90
8	SF3-8	03-sep-14	17-sep-14	14	40,05	30,10	1,818	10,0 10,0 10,0	10,2 10,1 10,1	53,65	
9	SF3-9	03-sep-14	17-sep-14	14	40,15	30,10	1,826	10,1 10,1 10,1	10,1 10,2 10,1	53,70	
10	SF3-10	03-sep-14	01-oct-14	28	40,25	30,15	1,979	10,1 10,3 10,3	10,2 10,2 10,1	56,41	56,17
11	SF3-11	03-sep-14	01-oct-14	28	40,1	30,05	1,972	10,5 10,6 10,5	10,3 10,3 10,2	53,37	
12	SF3-12	03-sep-14	01-oct-14	28	40,2	30,1	1,972	10,1 10,1 10,2	10,3 10,2 10,2	55,94	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.9 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.



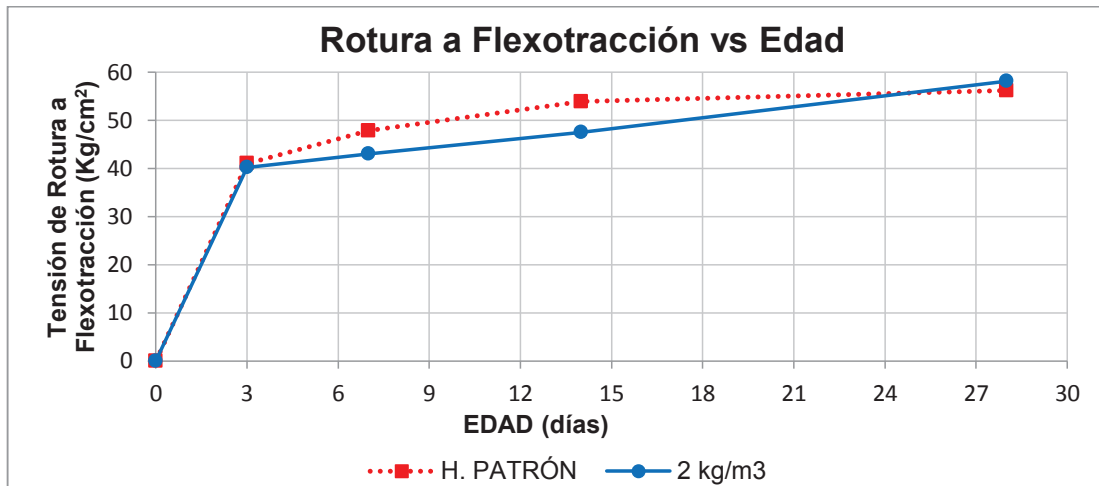
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.9 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 2 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	LONGITUD (cm)	LUZ ENTRE APOYOS (cm)	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		f _{cf} (Kg/cm ²)	PROM. f _{cf} (Kg/cm ²)
1	E31-V1	26-ago-14	29-ago-14	3	40,1	30	1,405	10,00 10,00 10,00	10,00 10,00 9,90	42,43	40,21
2	E31-V2	26-ago-14	29-ago-14	3	40,2	30,2	1,414	10,60 10,35 10,10	10,20 10,30 10,30	39,14	
3	E31-V3	26-ago-14	29-ago-14	3	40,15	30,4	1,386	10,40 10,20 10,30	10,20 10,30 10,20	39,06	
4	E31-V4	26-ago-14	02-sep-14	7	40,3	29,9	1,324	10,10 10,10 10,30	10,20 10,30 10,20	37,18	43,05
5	E31-V5	26-ago-14	02-sep-14	7	40,3	30,15	1,53	10,00 10,20 10,10	10,20 10,20 10,50	43,05	
6	E31-V6	26-ago-14	02-sep-14	7	40,2	29,95	1,179	10,00 10,00 10,10	10,20 10,20 10,20	33,83	
7	E31-V7	26-ago-14	09-sep-14	14	40,2	30,1	1,47	10,00 10,10 10,10	10,10 10,20 10,20	42,52	47,52
8	E31-V8	26-ago-14	09-sep-14	14	40,15	30,05	1,383	10,05 10,10 10,10	10,20 10,20 10,15	39,75	
9	E31-V9	26-ago-14	09-sep-14	14	40,1	31	1,624	10,10 10,20 10,15	10,20 10,25 10,20	47,52	
10	E31-V10	26-ago-14	23-sep-14	28	40,1	30	2,01	9,95 9,95 9,90	10,20 10,30 10,20	57,97	58,13
11	E31-V11	26-ago-14	23-sep-14	28	40,2	29,85	2,074	10,60 10,30 9,90	10,00 10,25 10,25	58,34	
12	E31-V12	26-ago-14	23-sep-14	28	40,1	29,95	2,102	10,05 10,10 10,10	10,40 10,40 10,30	58,10	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.10 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 2 kg/m³ DE FIBRA.



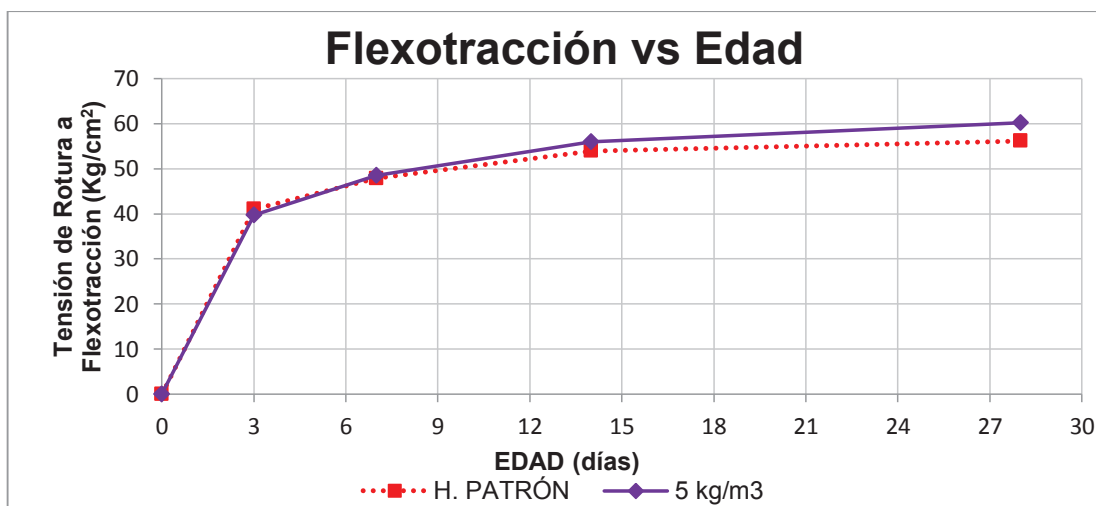
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.10 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 5 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	LONGITUD (cm)	LUZ ENTRE APOYOS (cm)	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (b x h)		f _{cf} (Kg/cm ²)	PROM. f _{cf} (Kg/cm ²)
1	E32-V1	08-sep-14	11-sep-14	3	40,3	30,25	1,343	9,9 9,9 10,0	10,2 10,2 10,2	39,51	39,69
2	E32-V2	08-sep-14	11-sep-14	3	40,25	30,2	1,411	10,1 10,1 10,1	10,3 10,2 10,2	40,55	
3	E32-V3	08-sep-14	11-sep-14	3	40,2	30,2	1,393	10,4 10,2 10,3	10,2 10,3 10,2	39,00	
4	E32-V4	08-sep-14	15-sep-14	7	40,15	30,1	1,656	10,2 10,2 10,2	10,2 10,3 10,3	46,82	48,46
5	E32-V5	08-sep-14	15-sep-14	7	40,15	29,9	1,673	9,9 9,9 9,9	10,0 10,3 10,5	48,17	
6	E32-V6	08-sep-14	15-sep-14	7	40,2	30,2	1,817	10,3 10,2 10,1	10,4 10,4 10,2	50,38	
7	E32-V7	08-sep-14	22-sep-14	14	40,2	30,05	1,94	10,0 10,0 10,0	10,3 10,3 10,2	55,67	55,94
8	E32-V8	08-sep-14	22-sep-14	14	40,15	30	1,9	10,0 10,0 9,9	10,2 10,2 10,2	55,15	
9	E32-V9	08-sep-14	22-sep-14	14	40,2	30,1	2,009	10,1 10,1 10,1	10,3 10,3 10,2	56,99	
10	E32-V10	08-sep-14	06-oct-14	28	40,3	30,2	2,202	10,2 10,2 10,3	10,2 10,2 10,2	62,87	60,19
11	E32-V11	08-sep-14	06-oct-14	28	40,2	30,2	2,134	10,4 10,5 10,5	10,2 10,3 10,2	59,38	
12	E32-V12	08-sep-14	06-oct-14	28	40,3	30,4	2,043	10,2 10,2 10,2	10,3 10,2 10,2	58,33	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.11 – CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 5 kg/m³ DE FIBRA.



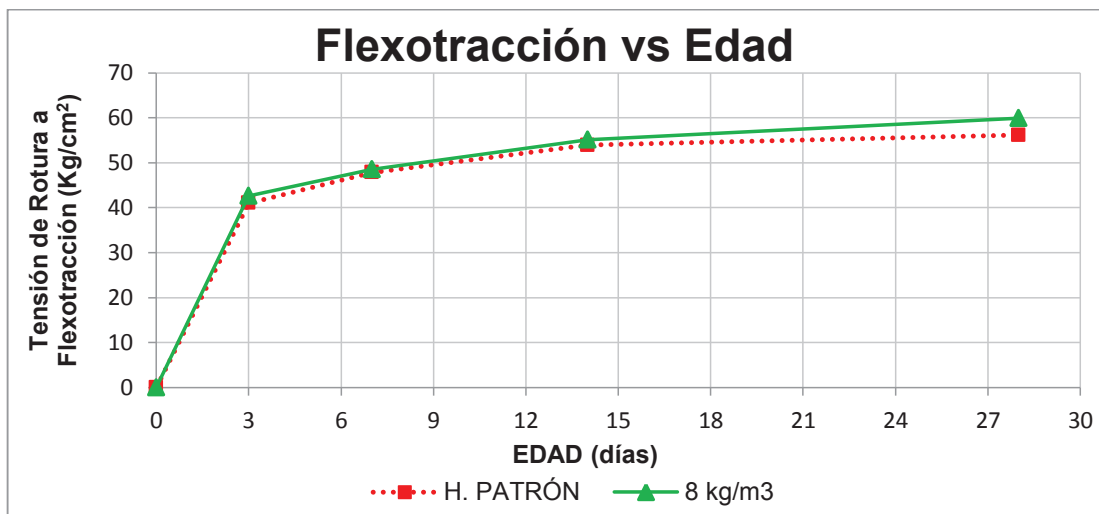
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.11 – RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 8 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	LONGITUD (cm)	LUZ ENTRE APOYOS (cm)	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		f _{cf} (Kg/cm ²)	PROM. f _{cf} (Kg/cm ²)
1	E33-V1	09-sep-14	12-sep-14	3	40,2	30,15	1,436	10,1 10,2 10,2	10,2 10,3 10,3	40,60	42,58
2	E33-V2	09-sep-14	12-sep-14	3	40,15	30,1	1,361	10,2 10,3 10,2	10,2 10,1 10,1	39,31	
3	E33-V3	09-sep-14	12-sep-14	3	40,2	30,2	1,566	10,1 10,2 10,2	10,2 10,3 10,3	44,57	
4	E33-V4	09-sep-14	16-sep-14	7	40,2	30,1	1,579	10,0 10,0 10,0	10,2 10,1 10,2	46,13	48,51
5	E33-V5	09-sep-14	16-sep-14	7	40,2	30,2	1,835	10,5 10,5 10,5	10,2 10,3 10,1	50,89	
6	E33-V6	09-sep-14	16-sep-14	7	40,1	30,1	1,759	10,1 10,2 10,0	10,1 10,3 10,2	50,55	
7	E33-V7	09-sep-14	23-sep-14	14	40,15	30,05	1,752	10,0 10,1 10,0	10,0 10,0 10,2	51,95	55,14
8	E33-V8	09-sep-14	23-sep-14	14	40,2	30,05	1,964	10,1 10,1 10,1	10,1 10,1 10,0	58,34	
9	E33-V9	09-sep-14	23-sep-14	14	40,2	30,15	1,965	10,1 10,1 10,0	10,3 10,4 10,3	55,29	
10	E33-V10	09-sep-14	07-oct-14	28	40,2	30,15	2,091	10,0 10,0 10,2	10,3 10,2 10,2	60,10	59,92
11	E33-V11	09-sep-14	07-oct-14	28	40,2	30,1	2,033	10,1 10,2 10,2	10,1 10,2 10,2	58,23	
12	E33-V12	09-sep-14	07-oct-14	28	40,15	30,2	2,095	9,8 10,0 9,9	10,2 10,3 10,2	61,43	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.12 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 8 kg/m³ DE FIBRA.



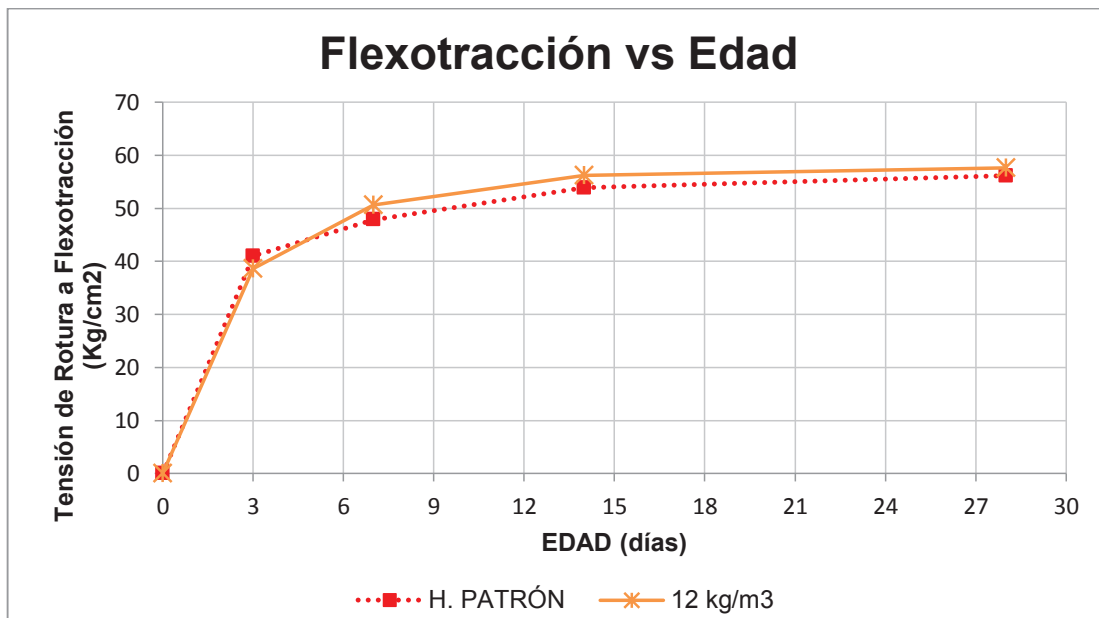
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.12 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 12 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	LONGITUD (cm)	LUZ ENTRE APOYOS (cm)	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bxh)		f _{cf} (Kg/cm²)	PROM. f _{cf} (Kg/cm²)
1	E34-V1	10-sep-14	13-sep-14	3	40,2	30,15	1,181	10,1 10,1	10,1 10,1	34,49	38,64
2	E34-V2	10-sep-14	13-sep-14	3	40,1	30,1	1,479	10,1 10,1	10,2 10,2	42,78	
3	E34-V3	10-sep-14	13-sep-14	3	40,2	30,1	1,303	10,1 10,1	10,3 10,1	37,39	
4	E34-V4	10-sep-14	17-sep-14	7	40,15	30,6	1,802	10,2 10,1	10,2 10,2	52,48	50,66
5	E34-V5	10-sep-14	17-sep-14	7	40,2	30,2	1,853	10,5 10,5	10,1 10,2	51,39	
6	E34-V6	10-sep-14	17-sep-14	7	40,2	30,25	1,628	10,0 10,0	10,3 10,1	48,12	
7	E34-V7	10-sep-14	24-sep-14	14	40,15	30,05	1,8	10,2 10,1	10,0 10,2	53,29	56,22
8	E34-V8	10-sep-14	24-sep-14	14	40,2	29,95	1,984	10,1 10,1	10,2 10,2	56,46	
9	E34-V9	10-sep-14	24-sep-14	14	40,2	30	2,07	10,0 10,1	10,4 10,2	58,92	
10	E34-V10	10-sep-14	08-oct-14	28	40,1	29,95	2,31	10,1 10,0	10,1 10,3	65,74	57,69
11	E34-V11	10-sep-14	08-oct-14	28	40,1	30,05	1,675	10,2 10,1	10,1 10,2	48,29	
12	E34-V12	10-sep-14	08-oct-14	28	40,05	30	2,011	10,1 10,1	10,0 10,1	59,04	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.13 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 12 kg/m³ DE FIBRA.



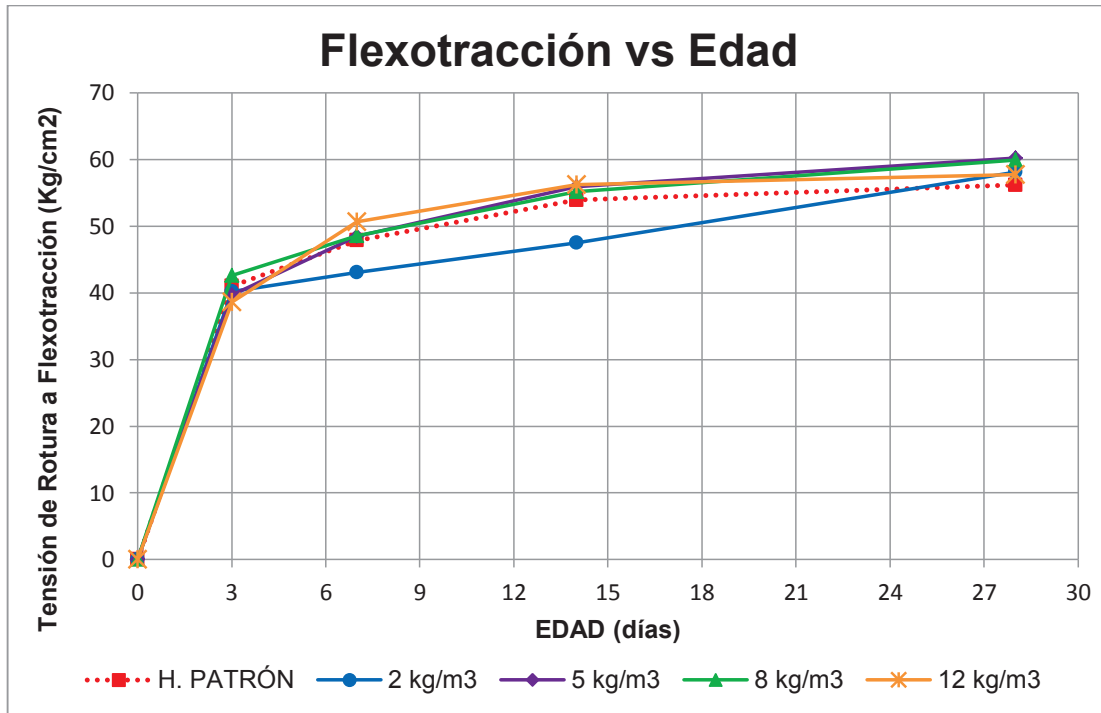
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.13 RESUMEN DE RESULTADOS DE TODOS LOS ENSAYOS DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.

EDAD (días)	f _{cf} PROMEDIO (Kg/cm ²)				
	Porcentaje de Fibras				
	PATRÓN	2 kg/m ³	5 kg/m ³	8 kg/m ³	12 kg/m ³
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	41.02	40.21	39.69	42.58	38.64
7	47.86	43.05	48.46	48.51	50.66
14	53.90	47.52	55.94	55.14	56.22
28	56.17	58.13	60.19	59.92	57.69

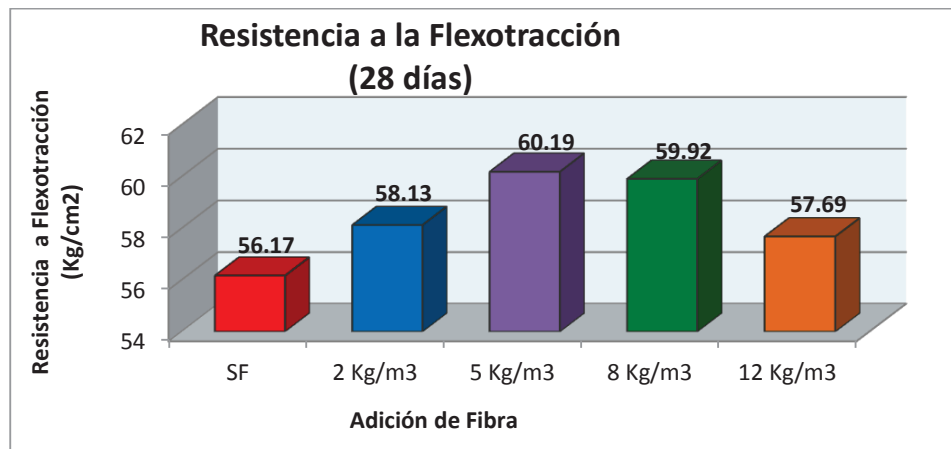
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.14 – RESUMEN DE TODAS LAS CURVAS DEL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.15 GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL H.A.R., RESPECTO AL INCREMENTO DE FIBRA.



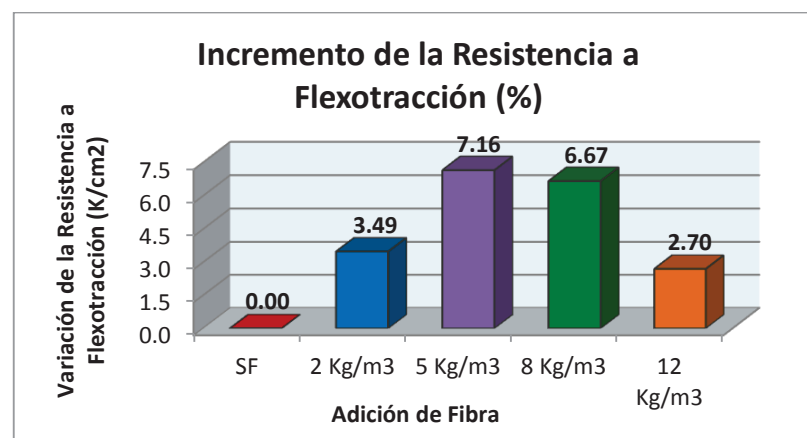
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.14 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN PARA H.A.R., RESPECTO A LA ADICIÓN DE FIBRA, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

ADICIÓN DE FIBRA	Resistencia a Flexotracción (Kg/cm ²)	%
SF	56,17	0,00
2 Kg/m ³	58,13	3,49
5 Kg/m ³	60,19	7,16
8 Kg/m ³	59,92	6,67
12 Kg/m ³	57,69	2,70

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.16 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DEL H.A.R., EN PORCENTAJE.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6.4 ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE.

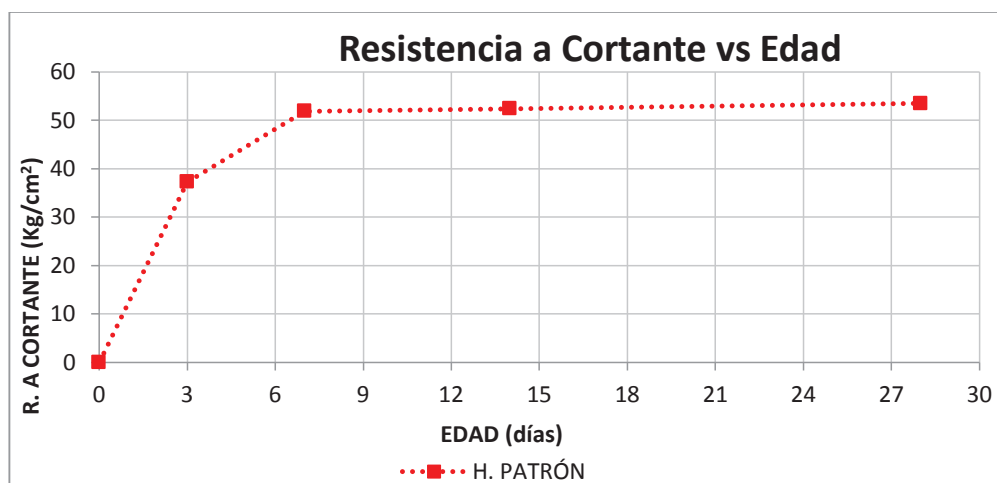
Norma Española UNE 83511

TABLA 6.15 – RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

Nº	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		τ (Kg/cm ²)	PROM. τ (Kg/cm ²)
1	SF5-1	12/09/2014	15/09/2014	3	8,676	10,1 10,1	10,1 10,1	42,53	37,22
2	SF5-2	12/09/2014	15/09/2014	3	7,699	10,2 10,2	9,9 9,9	38,31	
3	SF5-3	12/09/2014	15/09/2014	3	7,537	10,4 10,4	10,1 10,1	36,14	
4	SF5-4	05/09/2014	12/09/2014	7	10,57	10,3 10,3	10,1 10,0	51,06	51,87
5	SF5-5	05/09/2014	12/09/2014	7	11,588	10,2 10,2	10,1 10,1	56,38	
6	SF5-6	05/09/2014	12/09/2014	7	11,042	10,3 10,3	10,2 10,2	52,68	
7	SF5-7	05/09/2014	19/09/2014	14	10,444	10,2 10,2	10,0 10,0	51,32	52,36
8	SF5-8	05/09/2014	19/09/2014	14	10,373	10,2 10,1	10,0 10,1	51,10	
9	SF5-9	05/09/2014	19/09/2014	14	11,099	10,1 10,1	10,1 10,1	54,67	
10	SF5-10	05/09/2014	06/10/2014	31	11,74	10,1 10,1	10,1 10,1	57,54	55,15
11	SF5-11	05/09/2014	06/10/2014	31	10,517	10,4 10,3	10,1 10,1	50,80	
12	SF5-12	05/09/2014	06/10/2014	31	10,711	10,2 10,1	10,0 10,0	52,76	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.17 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.



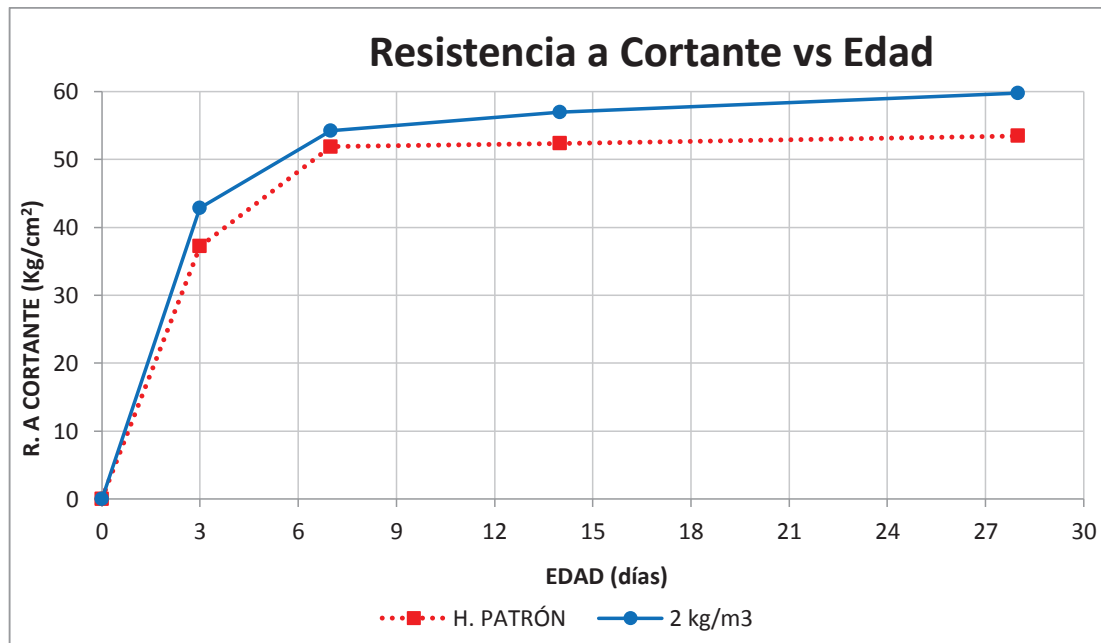
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.16 RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 2 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		τ (Kg/cm ²)	PROM. τ (Kg/cm ²)
1	E51-V1	23/09/2014	26/09/2014	3	8,905	10,1 10,1	10,3 10,3	42,91	42,85
2	E51-V2	23/09/2014	26/09/2014	3	9,013	10,3 10,3	10,3 10,2	42,79	
3	E51-V3	23/09/2014	26/09/2014	3	7,537	10,4 10,4	10,1 10,1	36,14	
4	E51-V4	23/09/2014	30/09/2014	7	10,196	10,2 10,2	10,1 10,1	49,73	54,20
5	E51-V5	23/09/2014	30/09/2014	7	11,626	10,5 10,4	10,1 10,1	55,48	
6	E51-V6	23/09/2014	30/09/2014	7	10,876	10,2 10,2	10,1 10,2	52,91	
7	E51-V7	23/09/2014	07/10/2014	14	12,553	10,3 10,5	10,3 10,4	58,31	56,99
8	E51-V8	23/09/2014	07/10/2014	14	10,129	10,3 10,2	10,2 10,2	48,44	
9	E51-V9	23/09/2014	07/10/2014	14	11,441	10,1 10,2	10,2 10,2	55,66	
10	E51-V10	23/09/2014	21/10/2014	28	11,074	10,3 10,2	10,1 10,0	54,02	59,77
11	E51-V11	23/09/2014	21/10/2014	28	12,318	10,4 10,3	10,3 10,2	58,34	
12	E51-V12	23/09/2014	21/10/2014	28	12,986	10,2 10,2	10,4 10,4	61,21	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.18 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 2kg/m^3 DE FIBRA.



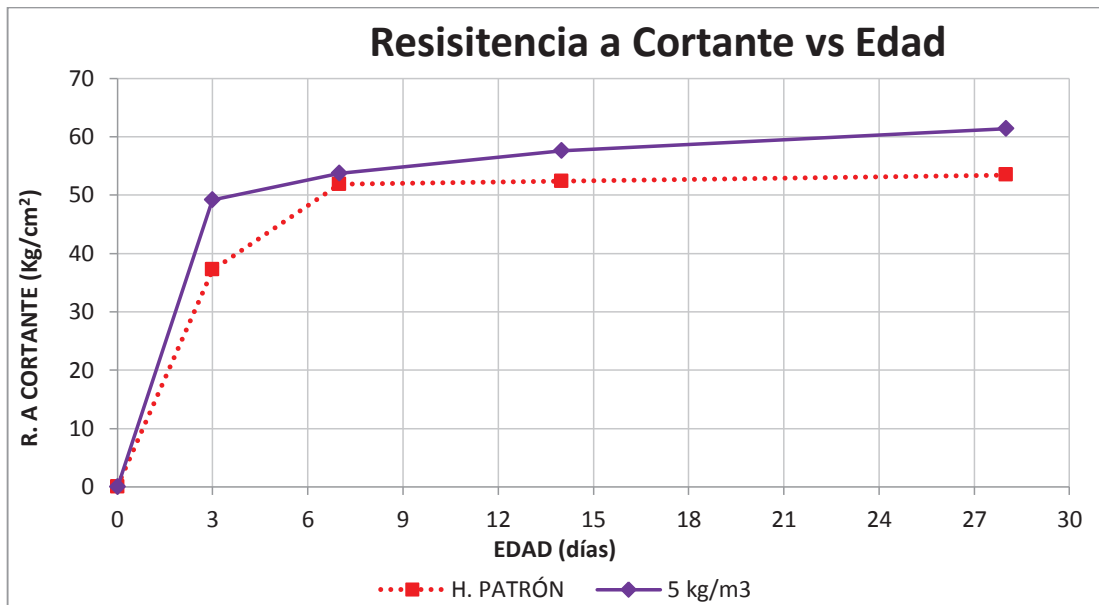
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.17 RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 5kg/m^3 DE FIBRA.

Nº	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		τ (Kg/cm ²)	PROM. τ (Kg/cm ²)
1	E52-V1	24/09/2014	27/09/2014	3	9,793	10,3 10,3	10,0 10,0	47,89	49,21
2	E52-V2	24/09/2014	27/09/2014	3	8,728	10,2 10,1	10,1 10,1	42,67	
3	E52-V3	24/09/2014	27/09/2014	3	10,643	10,3 10,4	10,2 10,2	50,53	
4	E52-V4	24/09/2014	01/10/2014	7	10,817	10,1 10,3	10,3 10,3	51,99	53,74
5	E52-V5	24/09/2014	01/10/2014	7	11,576	10,2 10,2	10,3 10,3	55,50	
6	E52-V6	24/09/2014	01/10/2014	7	10,119	10,4 10,4	10,2 10,1	48,05	
7	E52-V7	24/09/2014	08/10/2014	14	11,755	10,2 10,2	10,1 10,1	57,33	57,62
8	E52-V8	24/09/2014	08/10/2014	14	11,903	10,2 10,2	10,1 10,1	57,91	
9	E52-V9	24/09/2014	08/10/2014	14	11,082	10,3 10,3	10,0 10,0	54,06	
10	E52-V10	24/09/2014	22/10/2014	28	12,751	10,4 10,3	10,1 10,1	60,99	61,38
11	E52-V11	24/09/2014	22/10/2014	28	10,094	10,2 10,2	10,7 10,7	46,47	
12	E52-V12	24/09/2014	22/10/2014	28	12,725	10,3 10,2	10,1 10,1	61,76	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.19 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 5 kg/m³ DE FIBRA.



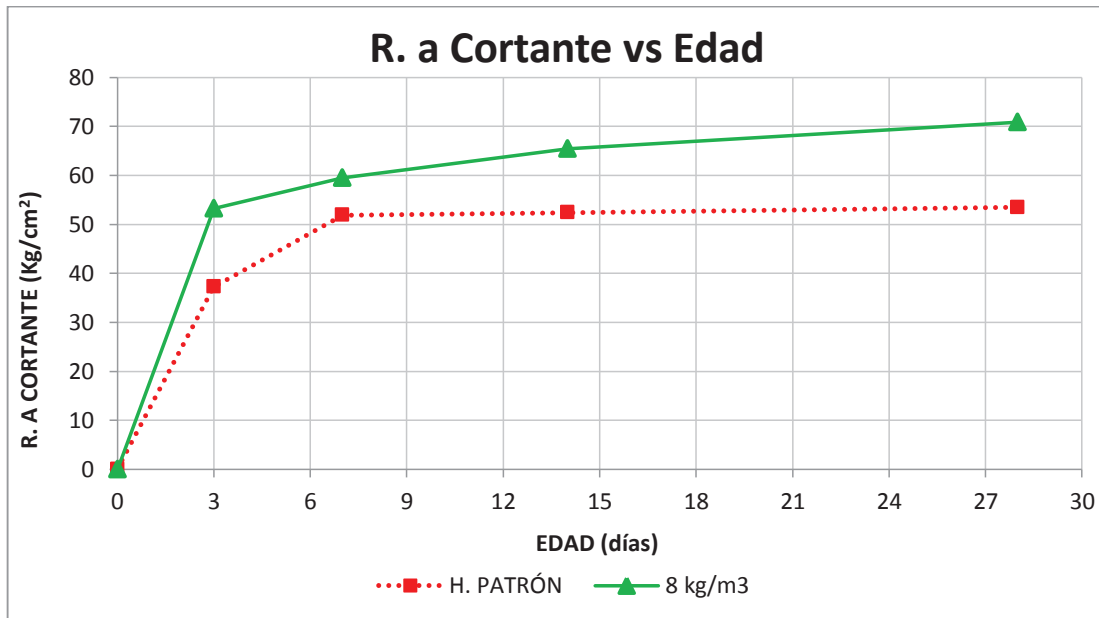
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.18 RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 8 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		τ (Kg/cm ²)	PROM. τ (Kg/cm ²)
1	E53-V1	26/09/2014	29/09/2014	3	10,647	10,3 10,2	10,1 10,0	51,76	53,24
2	E53-V2	26/09/2014	29/09/2014	3	10,95	10,3 10,3	10,0 10,0	53,41	
3	E53-V3	26/09/2014	29/09/2014	3	10,986	10,1 10,2	10,3 10,3	53,06	
4	E53-V4	26/09/2014	06/10/2014	10	13,736	10,3 10,3	10,1 10,2	66,34	64,11
5	E53-V5	26/09/2014	06/10/2014	10	12,655	10,2 10,2	10,1 10,0	61,88	
6	E53-V6	26/09/2014	06/10/2014	10	11,227	10,2 10,2	10,2 10,2	54,09	
7	E53-V7	26/09/2014	09/10/2014	13	13,618	10,2 10,1	10,1 10,1	66,75	63,38
8	E53-V8	26/09/2014	09/10/2014	13	13,239	10,4 10,4	10,1 10,1	63,32	
9	E53-V9	26/09/2014	09/10/2014	13	12,593	10,3 10,3	10,2 10,3	60,08	
10	E53-V10	26/09/2014	24/10/2014	28	14,523	10,3 10,5	10,2 10,2	68,79	70,85
11	E53-V11	26/09/2014	24/10/2014	28	14,577	10,2 10,2	10,0 10,0	71,63	
12	E53-V12	26/09/2014	24/10/2014	28	14,472	10,2 10,3	10,1 10,1	70,07	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.20 CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 8 kg/m³ DE FIBRA



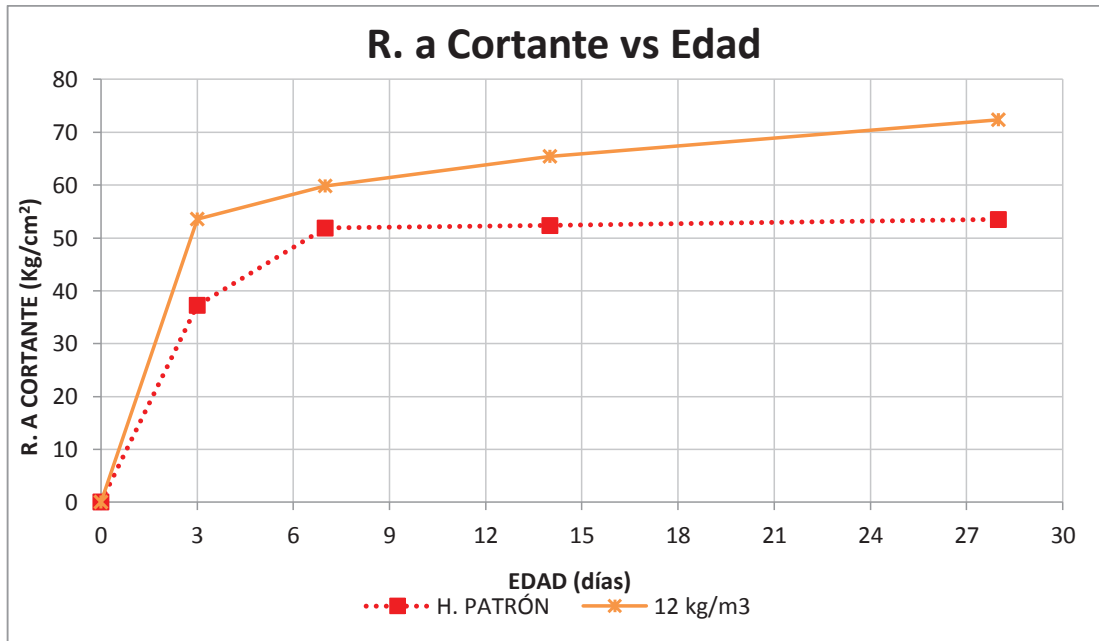
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.19 RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN CON ADICIÓN 12 kg/m³ DE FIBRA.

N°	IDENT.	FECHA ELABORACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD	CARGA DE ROTURA (Ton)	SECCIÓN (bXh)		τ (Kg/cm ²)	PROM. τ (Kg/cm ²)
1	E54-V1	29/09/2014	02/10/2014	3	9,219	10,0 10,1	10,2 10,2	45,19	53,58
2	E54-V2	29/09/2014	02/10/2014	3	11,437	10,4 10,3	10,2 10,2	54,43	
3	E54-V3	29/09/2014	02/10/2014	3	10,89	10,2 10,1	10,2 10,2	52,72	
4	E54-V4	29/09/2014	06/10/2014	7	12,903	10,3 10,2	10,3 10,3	61,41	59,80
5	E54-V5	29/09/2014	06/10/2014	7	10,004	10,4 10,5	10,2 10,2	47,04	
6	E54-V6	29/09/2014	06/10/2014	7	12,466	10,4 10,4	10,3 10,4	58,19	
7	E54-V7	29/09/2014	13/10/2014	14	14,696	10,3 10,3	10,2 10,4	69,26	65,44
8	E54-V8	29/09/2014	13/10/2014	14	12,79	10,2 10,3	10,2 10,2	61,62	
9	E54-V9	29/09/2014	13/10/2014	14	12,377	10,3 10,3	10,0 10,0	60,38	
10	E54-V10	29/09/2014	27/10/2014	28	13,934	10,2 10,2	10,0 10,0	68,64	72,30
11	E54-V11	29/09/2014	27/10/2014	28	14,857	10,2 10,2	10,3 10,2	71,40	
12	E54-V12	29/09/2014	27/10/2014	28	14,971	10,2 10,3	10,0 10,0	73,21	

Elaborado por: F. Guamán – J. Pilatasig.

FIGURA 6.21 – CURVA DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 12 kg/m³ DE FIBRA.



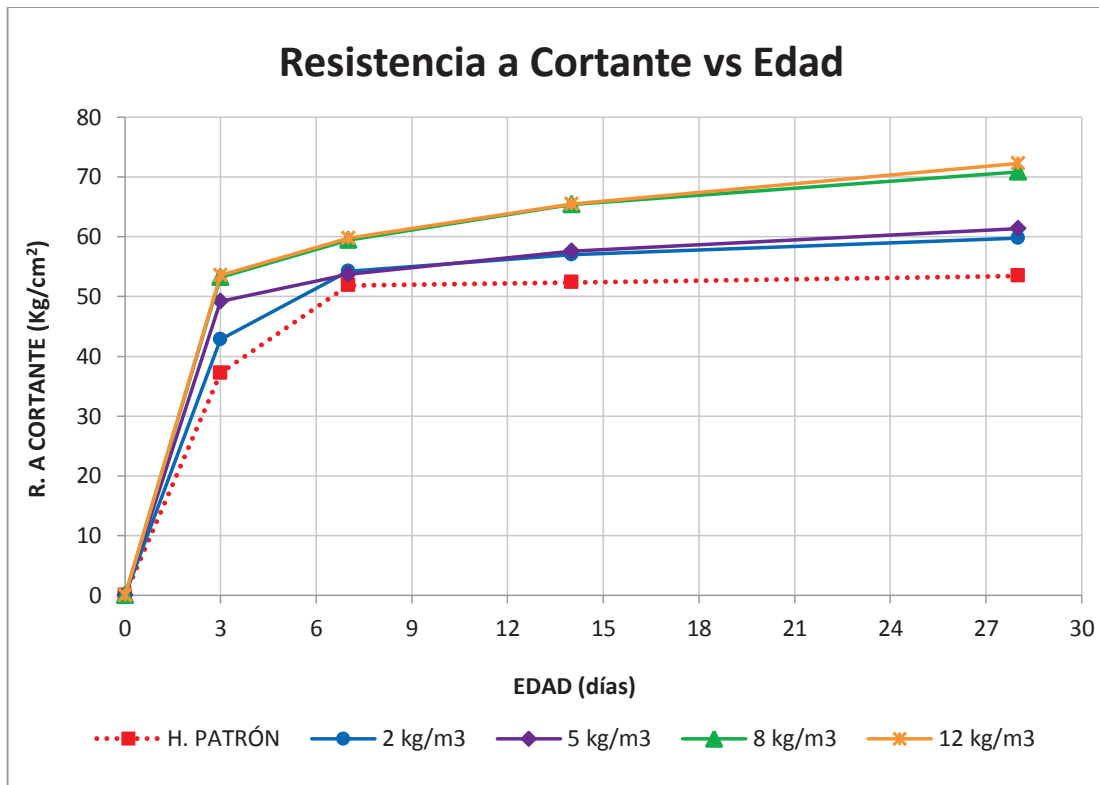
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.20 RESUMEN DE RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.

EDAD (días)	f_{cf} PROMEDIO (Kg/cm ²)				
	Porcentaje de Fibras				
	H. PATRÓN	2 kg/m ³	5 kg/m ³	8 kg/m ³	12 kg/m ³
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	37,22	42,85	49,21	53,24	53,58
7	51,87	54,20	53,74	59,45	59,80
14	52,36	56,99	57,62	65,42	65,44
28	53,47	59,77	61,38	70,85	72,30

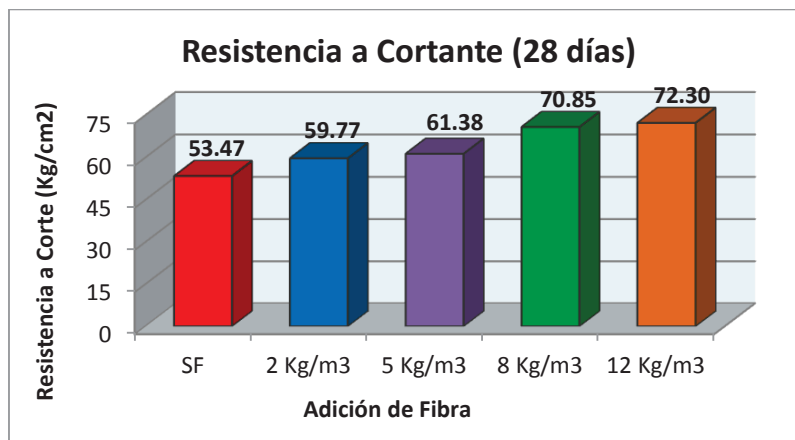
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.22 CURVAS DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.23 GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE DEL H.A.R., RESPECTO A LA ADICIÓN DE FIBRA.



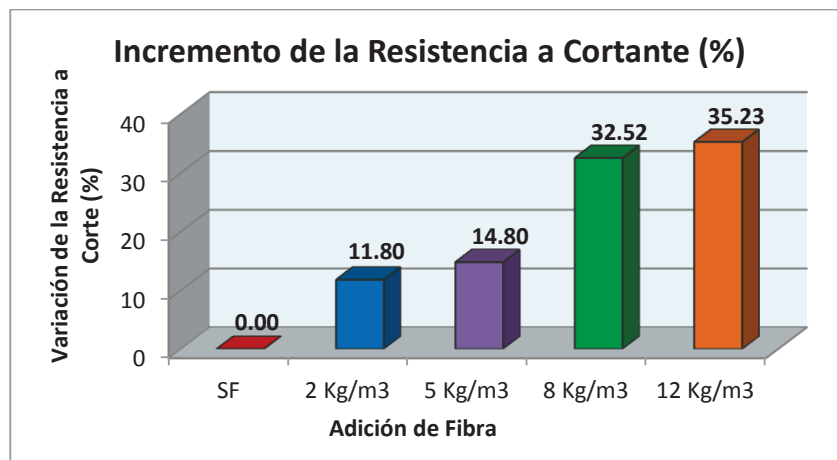
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.21 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE PARA H.A.R.,
DEBIDA A LA ADICIÓN DEL FIBRA, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

ADICIÓN DE FIBRA	Resistencia a Cortante (Kg/cm ²)	%
SF	53.47	0.00
2 Kg/m ³	59.77	11.80
5 Kg/m ³	61.38	14.80
8 Kg/m ³	70.85	32.52
12 Kg/m ³	72.30	35.23

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.24 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE DEL H.A.R., EN PORCENTAJE.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6.5 ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN

TABLA 6.22 DATOS PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

MUESTRA:	MSF-1	ϕ :	10,1	cm
F. FABRICACIÓN:	12/09/2014	h :	20	cm
F. ENSAYO:	22/01/2015	PESO:	3746,9	gr.
EDAD:	132 días	ÁREA:	80,12	cm ²
		P. ESPEC.:	2,34	gr./cm ³

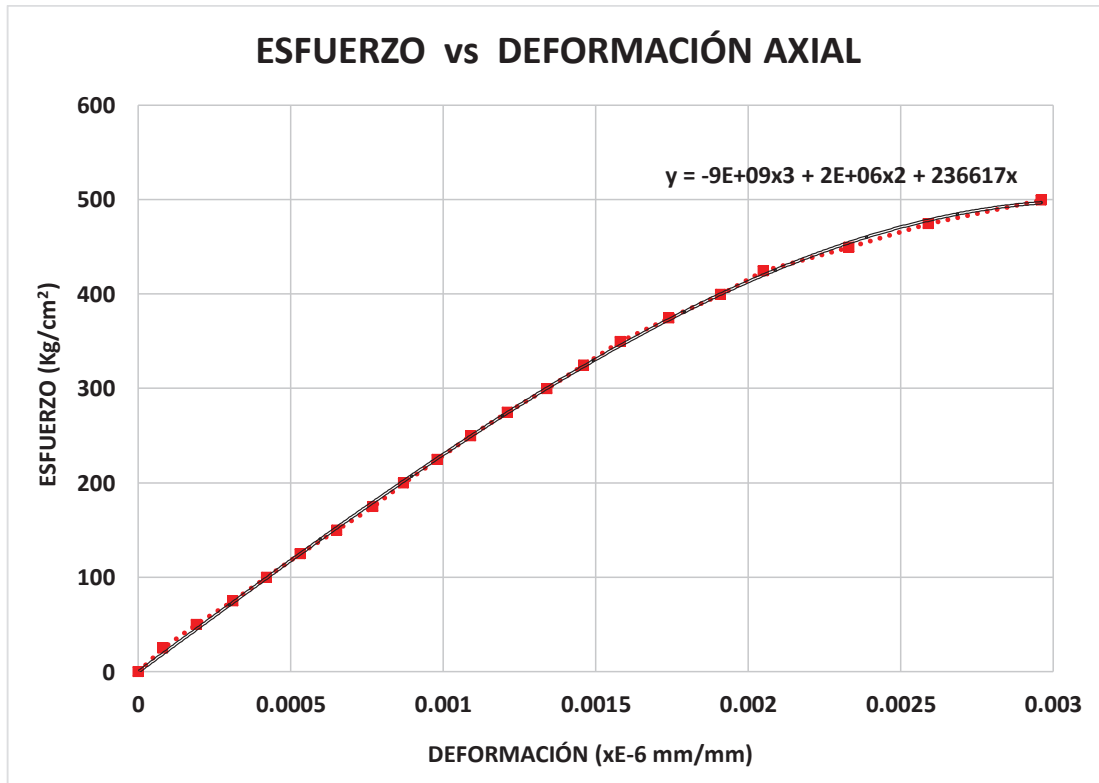
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.23 RESULTADOS ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
2	0,00008	24,96
4	0,00019	49,93
6	0,00031	74,89
8	0,00042	99,85
10	0,00053	124,82
12	0,00065	149,78
14	0,00077	174,74
16	0,00087	199,70
18	0,00098	224,67
20	0,00109	249,63
22	0,00121	274,59
24	0,00134	299,56
26	0,00146	324,52
28	0,00158	349,48
30	0,00174	374,45
32	0,00191	399,41
34	0,00205	424,37
36	0,00233	449,33
38	0,00259	474,30
40	0,00296	499,26
Carga Máxima =	41563	Kg
TENACIDAD=	0,9	Kg/cm²
Esfuerzo Máximo =	518,77	Kg/cm²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.25 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.24 DATOS PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN 2KG/M³ DE FIBRA.

MUESTRA:	M17	φ :	10,1	cm
F. FABRICACIÓN:	23/09/2014	h :	20,15	cm
F. ENSAYO:	24/01/2015	PESO:	3779,5	gr.
EDAD:	123 días	ÁREA:	80,12	cm ²
		P. ESPEC.:	2,34	gr./cm ³

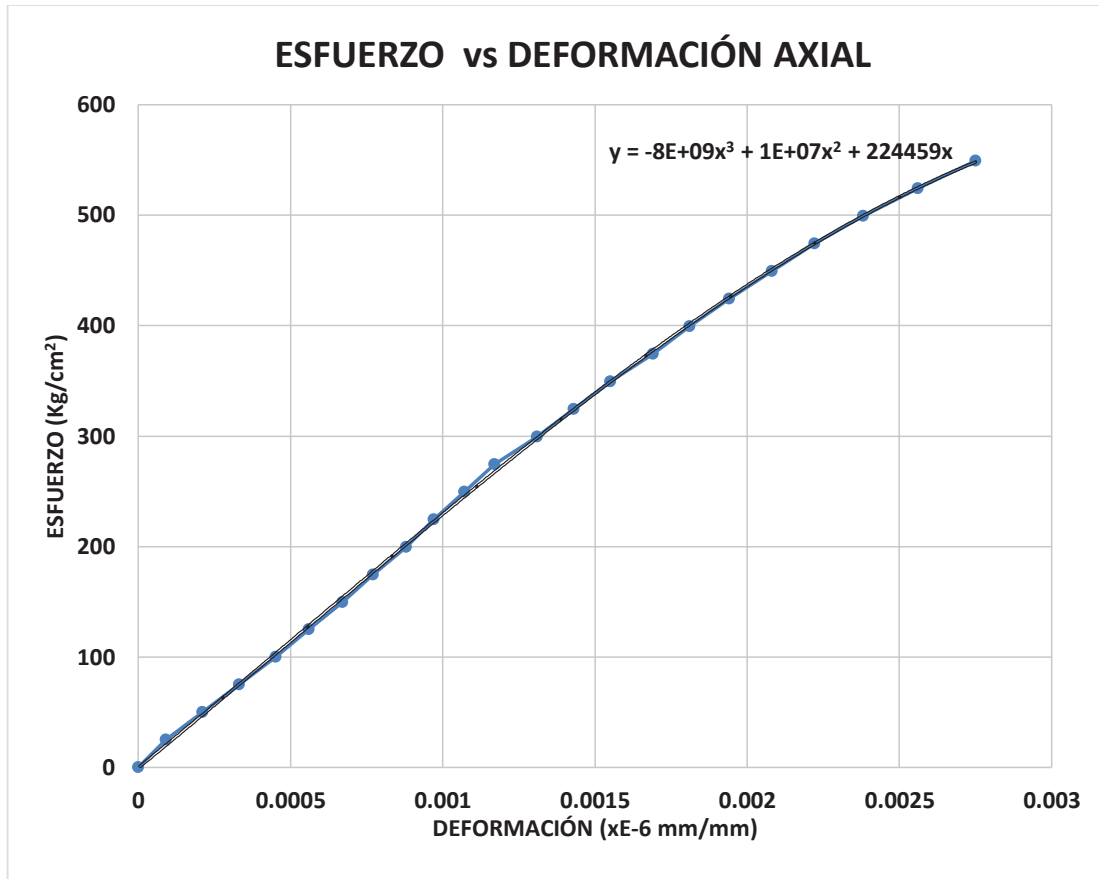
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.25 RESULTADOS ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN 2KG/M³ DE FIBRA.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
2	0,00009	24,96
4	0,00021	49,93
6	0,00033	74,89
8	0,00045	99,85
10	0,00056	124,82
12	0,00067	149,78
14	0,00077	174,74
16	0,00088	199,70
18	0,00097	224,67
20	0,00107	249,63
22	0,00117	274,59
24	0,00131	299,56
26	0,00143	324,52
28	0,00155	349,48
30	0,00169	374,45
32	0,00181	399,41
34	0,00194	424,37
36	0,00208	449,33
38	0,00222	474,30
40	0,00238	499,26
42	0,00256	524,22
44	0,00275	549,19
Carga Máxima =	45784	Kg
Tenacidad =	0,8037	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	571,45	Kg/cm ²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.26 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 2kg/m³ DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.26 DATOS PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 5KG/M³

MUESTRA:	M42	φ :	10,1	cm
F. FABRICACIÓN:	24/09/2014	h :	20	cm
F. ENSAYO:	24/01/2015	PESO:	3698,8	gr.
EDAD:	122 días	ÁREA:	80,12	cm ²
		P. ESPEC.:	2,31	gr./cm ³

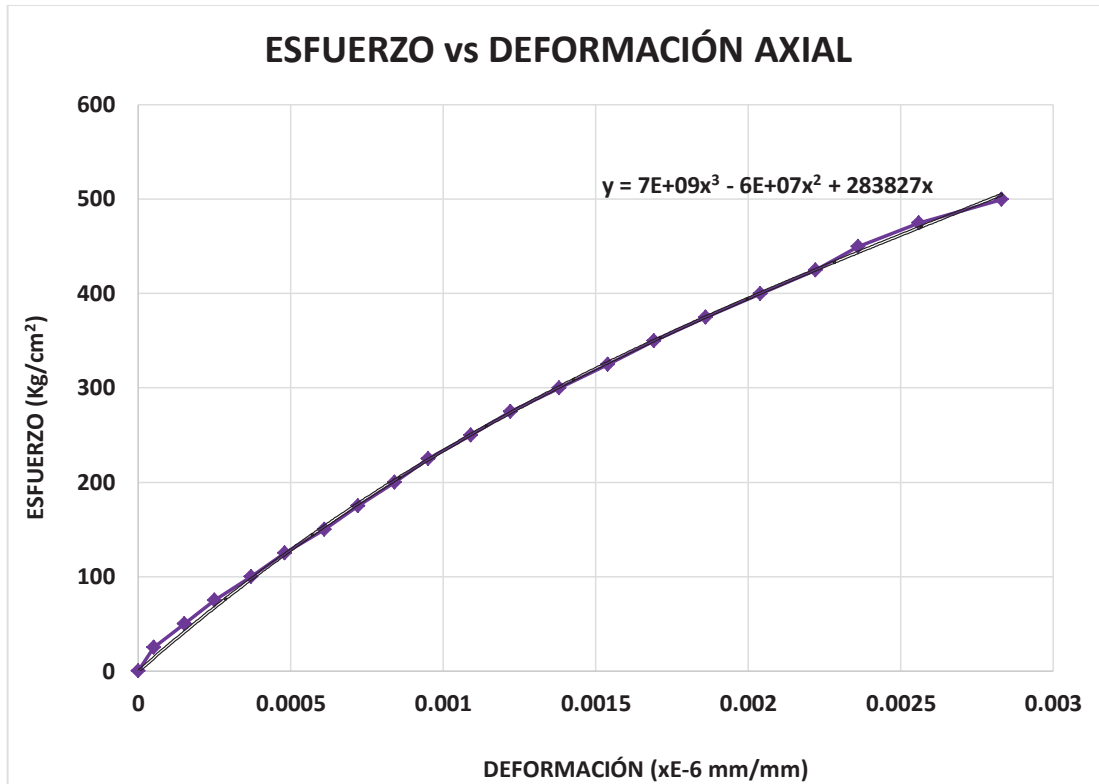
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.27 – RESULTADOS ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN 5KG/M³ DE FIBRA.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm²)
0	0	0,00
2	0,00005	24,96
4	0,00015	49,93
6	0,00025	74,89
8	0,00037	99,85
10	0,00048	124,82
12	0,00061	149,78
14	0,00072	174,74
16	0,00084	199,70
18	0,00095	224,67
20	0,00109	249,63
22	0,00122	274,59
24	0,00138	299,56
26	0,00154	324,52
28	0,00169	349,48
30	0,00186	374,45
32	0,00204	399,41
34	0,00222	424,37
36	0,00236	449,33
38	0,00256	474,30
40	0,00283	499,26
Carga Máxima =	40380	Kg
Tenacidad =	0,796	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	504,00	Kg/cm ²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.27 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 5kg/m³ DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.28 DATOS PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN 8kg/m³ DE FIBRA.

MUESTRA: M67	φ : 10,1 cm
F. FABRICACIÓN: 26/09/2014	h : 20,15 cm
F. ENSAYO: 28/01/2015	PESO: 3749,8 gr.
EDAD: 124 días	ÁREA: 80,12 cm ²
	P. ESPEC.: 2,32 gr./cm ³

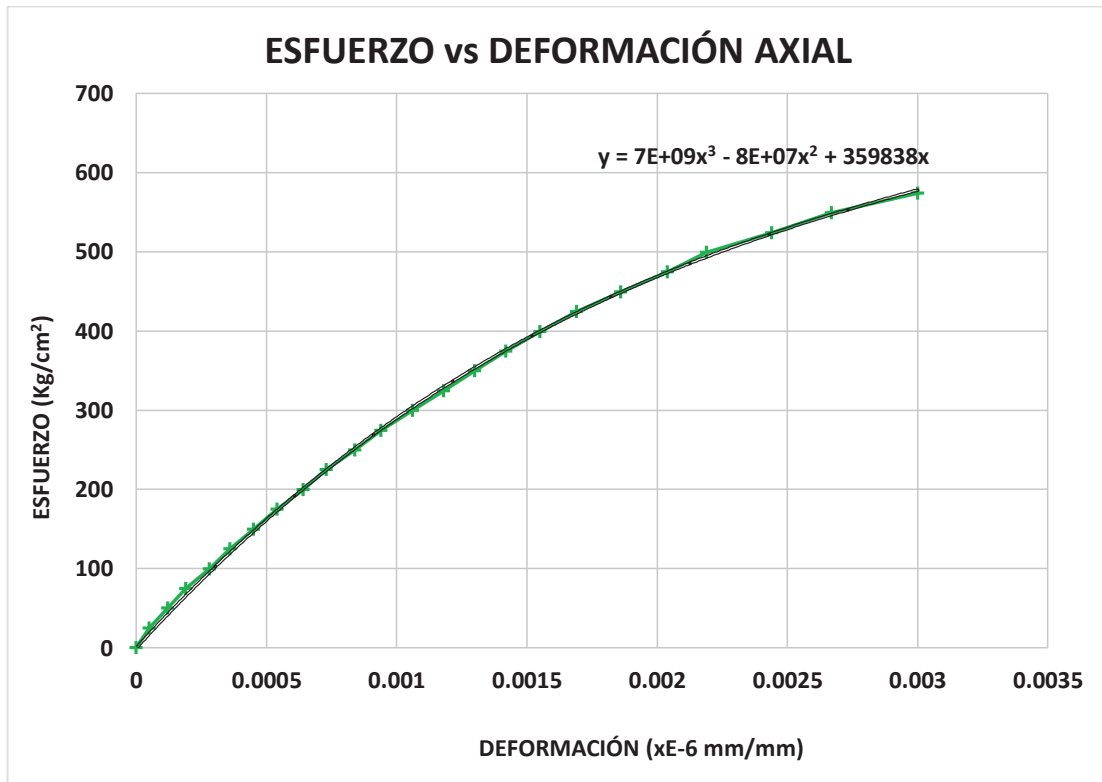
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.29 RESULTADOS ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN DE 8kg/m^3 DE FIBRA.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10^{-6})	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
2	0,00005	24,96
4	0,00012	49,93
6	0,00019	74,89
8	0,00028	99,85
10	0,00036	124,82
12	0,00045	149,78
14	0,00054	174,74
16	0,00064	199,70
18	0,00073	224,67
20	0,00084	249,63
22	0,00094	274,59
24	0,00106	299,56
26	0,00118	324,52
28	0,0013	349,48
30	0,00142	374,45
32	0,00155	399,41
34	0,00169	424,37
36	0,00186	449,33
38	0,00204	474,30
40	0,00219	499,26
42	0,00244	524,22
44	0,00267	549,19
46	0,003	574,15
Carga Máxima =	46017	Kg
Tenacidad =	0,899	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	574,36	Kg/cm ²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.28 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN
CON ADICIÓN DE FIBRA
8kg/m³



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.30 DATOS PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA
TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 12kg/m³

MUESTRA: M100	φ : 10,1 cm
F. FABRICACIÓN: 29/09/2014	h : 20,2 cm
F. ENSAYO: 24/01/2015	PESO: 3689,6 gr.
EDAD: 117 días	ÁREA: 80,12 cm ²
	P. ESPEC.: 2,28 gr./cm ³

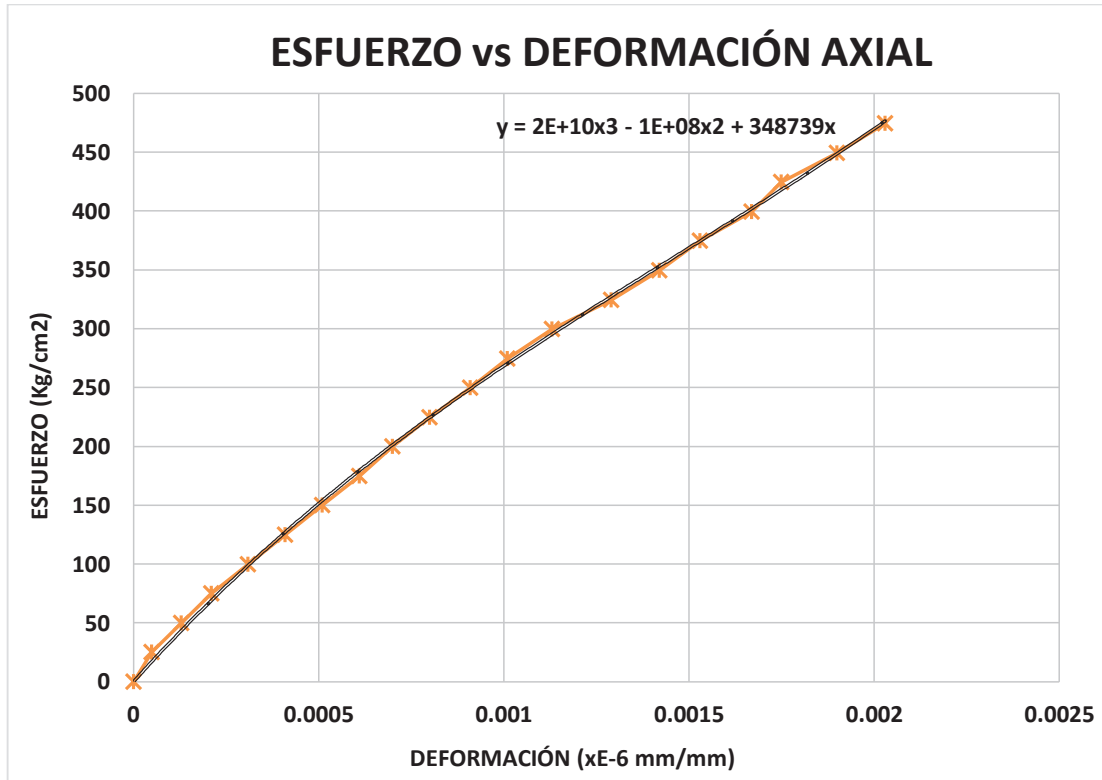
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.31 RESULTADOS ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 12kg/m³

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
2	0,00005	24,96
4	0,00013	49,93
6	0,00021	74,89
8	0,00031	99,85
10	0,00041	124,82
12	0,00051	149,78
14	0,00061	174,74
16	0,0007	199,70
18	0,0008	224,67
20	0,00091	249,63
22	0,00101	274,59
24	0,00113	299,56
26	0,00129	324,52
28	0,00142	349,48
30	0,00153	374,45
32	0,00167	399,41
34	0,00175	424,37
36	0,0019	449,33
38	0,00203	474,30
Carga Máxima =	39621	Kg
Tenacidad =	0,5246	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	494,53	Kg/cm ²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.29 CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN 12kg/m³ DE FIBRA.



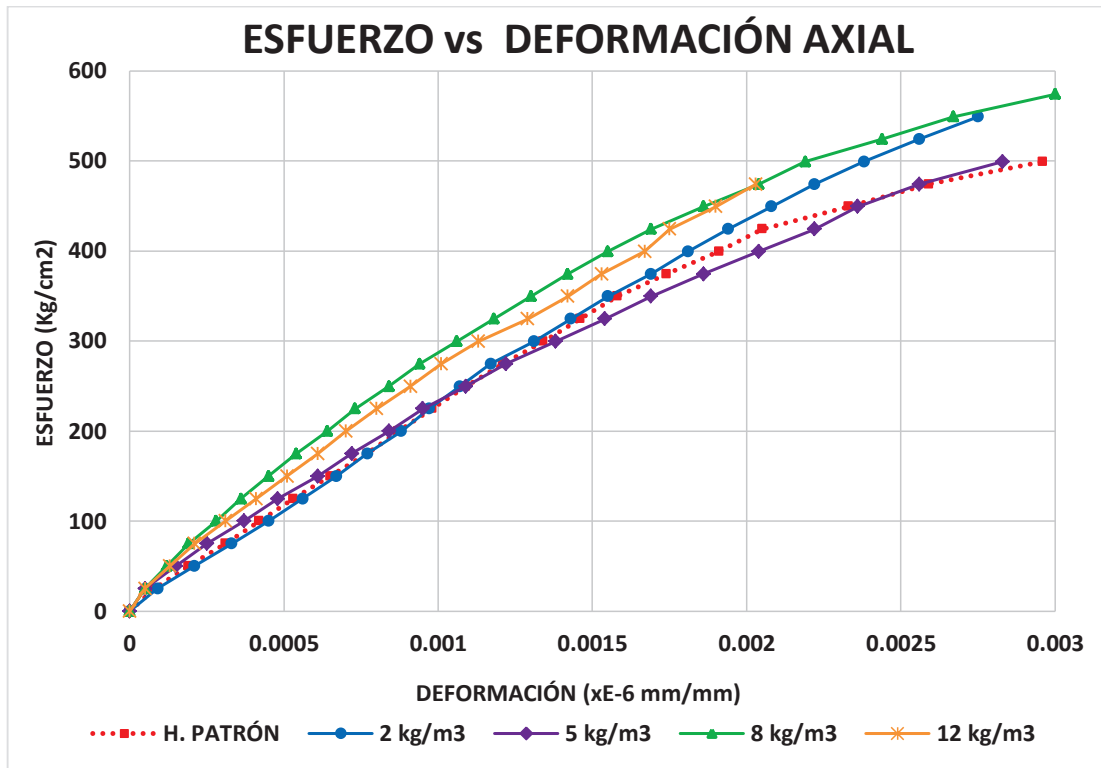
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.32 RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYOS DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.

Adición de Fibra (Kg/m ³)	F'c Kg/cm ²	TENACIDAD Kg/cm ²
SF	518.77	0.881
2	571.45	0.804
5	504.00	0.796
8	574.36	0.899
12	494.53	0.525

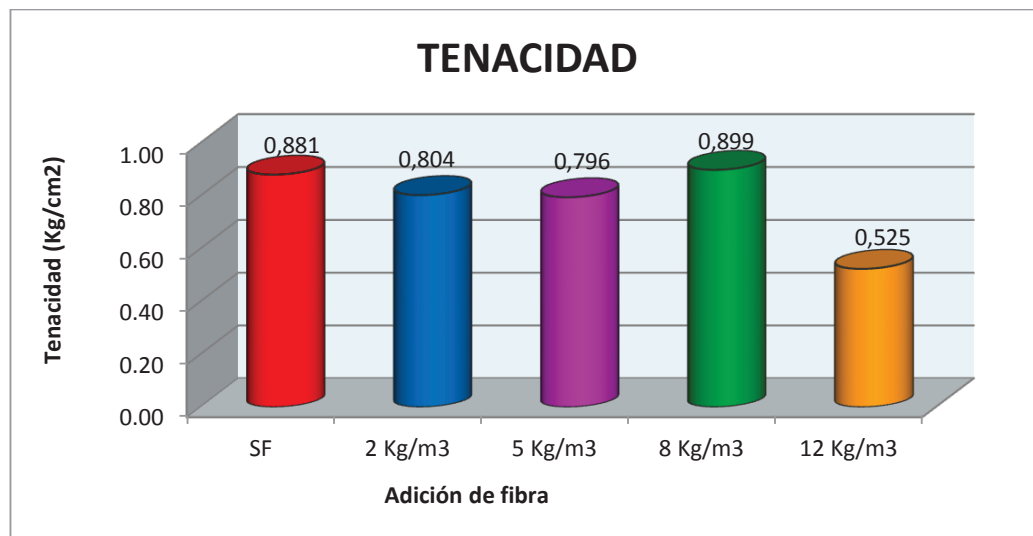
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.30 CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.31 GRÁFICO COMPARATIVO DEL DESARROLLO DE LA TENACIDAD DEL H.A.R., RESPECTO A LA ADICIÓN DE FIBRA.



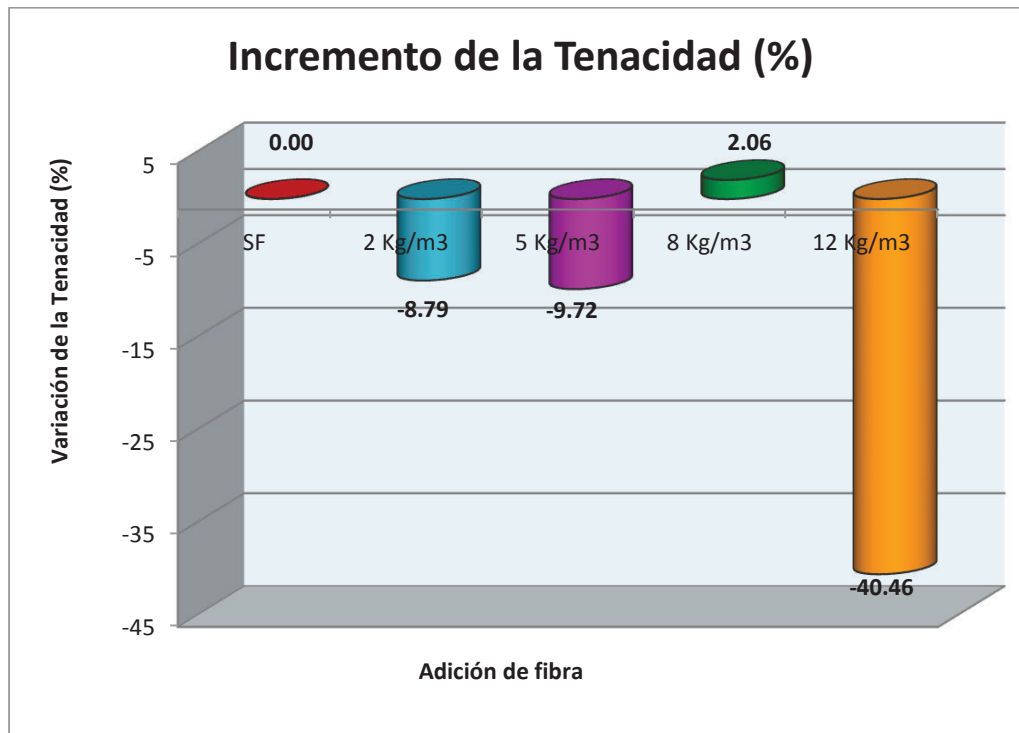
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.33 VARIACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN DEBIDA A LA ADICIÓN DE FIBRA, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

ADICIÓN DE FIBRA (Kg/m ³)	Tenacidad a los 132 días de edad (Kg/cm ²)	%
SF	0,88	0,00
2 Kg/m ³	0,80	-8,79
5 Kg/m ³	0,80	-9,72
8 Kg/m ³	0,90	2,06
12 Kg/m ³	0,52	-40,46

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.32 VARIACIÓN DE LA TENACIDAD A COMPRESIÓN DEL H.A.R, EN PORCENTAJE



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

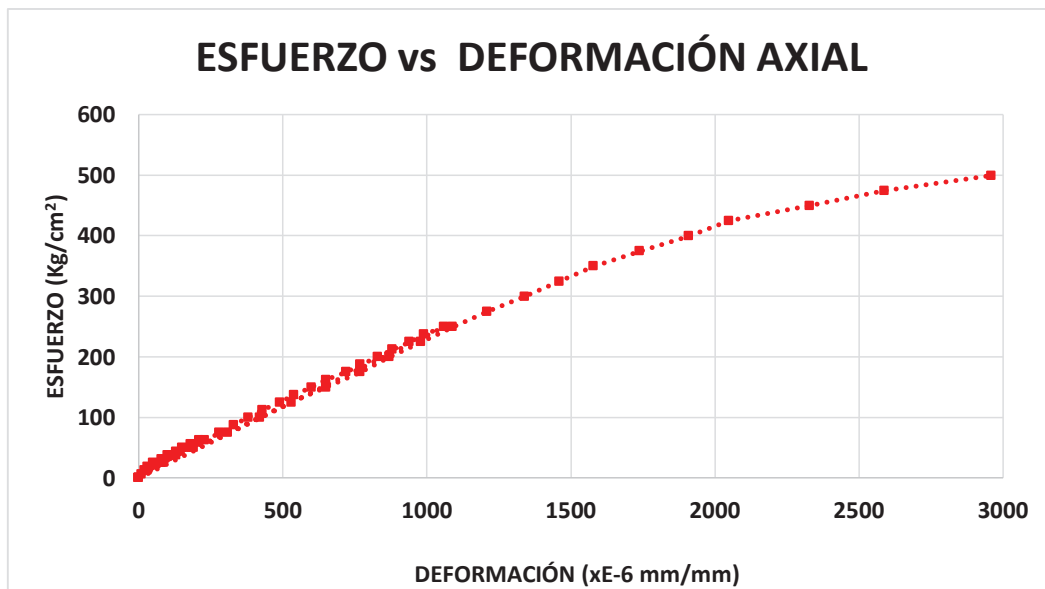
6.6 ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

TABLA 6.34 DATOS DE PROBETA PARA ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

MUESTRA:	MSF-1
F. FABRICACIÓN:	12/09/2014
F. ENSAYO:	22/01/2015
EDAD:	132 días
φ :	10.1 cm
h :	20 cm
PESO:	3746.9 gr.
ÁREA:	80.12 cm ²
P. ESPEC.:	2.34 gr./cm ³

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.33 CURVA DE TODOS LOS CICLOS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.35 DATOS Y RESULTADOS DEL ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN SIN ADICIÓN DE FIBRA.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL ($\times 10^{-6}$)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0,0	0	0,00
0,5	10	6,24
1,0	20	12,48
1,5	30	18,72
2,0	50	24,96
2,5	80	31,20
3,0	100	37,44
3,5	130	43,69
4,0	150	49,93
4,5	180	56,17
5,0	210	62,41
0	0	0,00
1	30	12,48
2	80	24,96
3	130	37,44
4	180	49,93
5	230	62,41
6	280	74,89
7	330	87,37
8	380	99,85
9	430	112,33
10	490	124,82
11	540	137,30
12	600	149,78
13	650	162,26
14	720	174,74
15	770	187,22
16	830	199,70
17	880	212,19
18	940	224,67
19	990	237,15
20	1060	249,63
0	0	0,00
2	80	24,96
4	190	49,93
6	310	74,89
8	420	99,85
10	530	124,82
12	650	149,78
14	770	174,74
16	870	199,70
18	980	224,67
20	1090	249,63
22	1210	274,59
24	1340	299,56
26	1460	324,52
28	1580	349,48
30	1740	374,45
32	1910	399,41
34	2050	424,37
36	2330	449,33
38	2590	474,30
40	2960	499,26
Carga Máxima =	41563	Kg
Módulo Elástico =	224612,6	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	518,77	Kg/cm ²

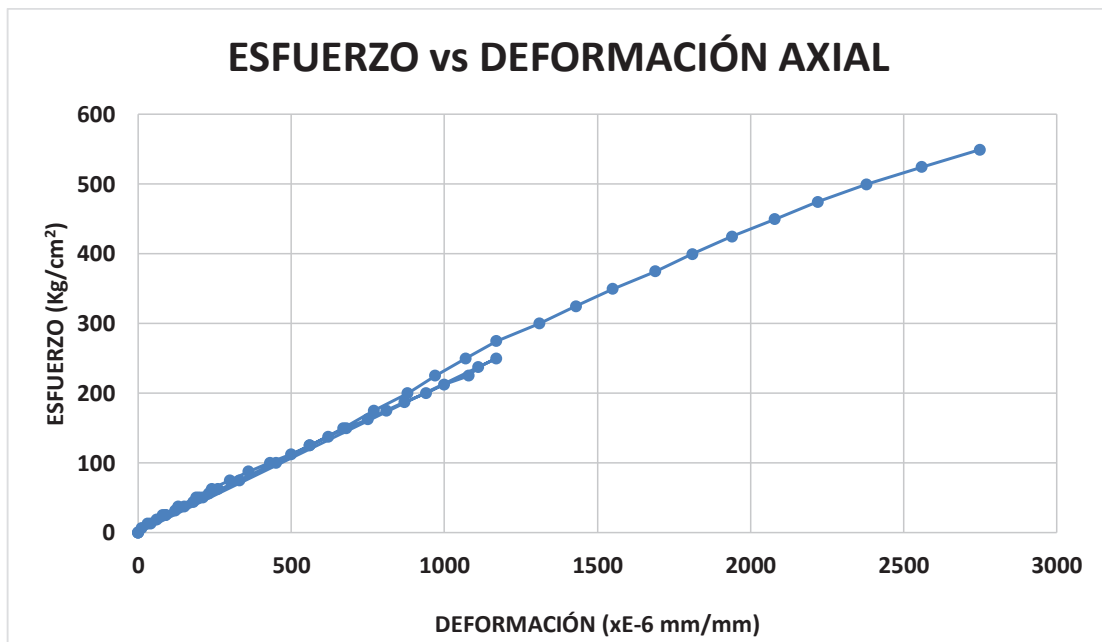
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.36 DATOS DE LA PROBETA PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 2kg/m³

MUESTRA:	M17
F. FABRICACIÓN:	23/09/2014
F. ENSAYO:	24/01/2015
EDAD:	123 días
φ :	10.1 cm
h :	20.15 cm
PESO:	3779.5 gr.
ÁREA:	80.12 cm ²
P. ESPEC.:	2.34 gr./cm ³

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.34 CURVA DE TODOS LOS CICLOS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 2kg/m³



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.37 RESULTADOS DEL ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 2kg/m³

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
0,5	10	6,24
1,0	40	12,48
1,5	60	18,72
2,0	90	24,96
2,5	120	31,20
3,0	150	37,44
3,5	180	43,69
4,0	200	49,93
4,5	230	56,17
5,0	260	62,41
0	0	0,00
1	30	12,48
2	80	24,96
3	130	37,44
4	190	49,93
5	240	62,41
6	300	74,89
7	360	87,37
8	430	99,85
9	500	112,33
10	560	124,82
11	620	137,30
12	680	149,78
13	750	162,26
14	810	174,74
15	870	187,22
16	940	199,70
17	1000	212,19
18	1080	224,67
19	1110	237,15
20	1170	249,63
0	0	0,00
2	90	24,96
4	210	49,93
6	330	74,89
8	450	99,85
10	560	124,82
12	670	149,78
14	770	174,74
16	880	199,70
18	970	224,67
20	1070	249,63
22	1170	274,59
24	1310	299,56
26	1430	324,52
28	1550	349,48
30	1690	374,45
32	1810	399,41
34	1940	424,37
36	2080	449,33
38	2220	474,30
40	2380	499,26
42	2560	524,22
44	2750	549,19
Carga Máxima =	45784	Kg
Módulo Elástico =	229472,9	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	571,45	Kg/cm ²

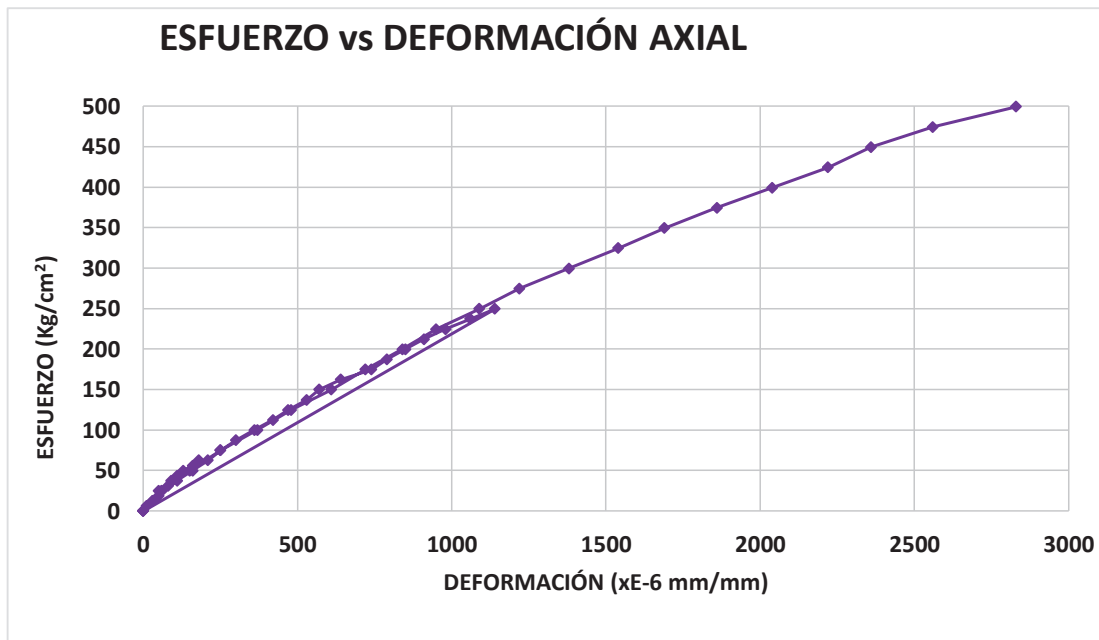
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.38 DATOS DE LA PROBETA PARA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 5kg/m³

MUESTRA:	M42
F. FABRICACIÓN:	24/09/2014
F. ENSAYO:	24/01/2015
EDAD:	122 días
ϕ :	10.1 cm
h :	20 cm
PESO:	3698.8 gr.
ÁREA:	80.12 cm ²
P. ESPEC.:	2.31 gr./cm ³

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.35 CURVA DE TODOS LOS CICLOS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 5kg/m³



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.39 RESULTADOS DEL ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 5kg/m³.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
0,5	10	6,24
1,0	30	12,48
1,5	50	18,72
2,0	60	24,96
2,5	80	31,20
3,0	90	37,44
3,5	110	43,69
4,0	130	49,93
4,5	160	56,17
5,0	180	62,41
0	0	0,00
1	30	12,48
2	60	24,96
3	110	37,44
4	160	49,93
5	210	62,41
6	250	74,89
7	300	87,37
8	360	99,85
9	420	112,33
10	470	124,82
11	530	137,30
12	570	149,78
13	640	162,26
14	740	174,74
15	790	187,22
16	850	199,70
17	910	212,19
18	980	224,67
19	1060	237,15
20	1140	249,63
0	0	0,00
2	50	24,96
4	150	49,93
6	250	74,89
8	370	99,85
10	480	124,82
12	610	149,78
14	720	174,74
16	840	199,70
18	950	224,67
20	1090	249,63
22	1220	274,59
24	1380	299,56
26	1540	324,52
28	1690	349,48
30	1860	374,45
32	2040	399,41
34	2220	424,37
36	2360	449,33
38	2560	474,30
40	2830	499,26
Carga Máxima =	40380	Kg
Módulo Elástico =	221251,6	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	504,00	Kg/cm ²

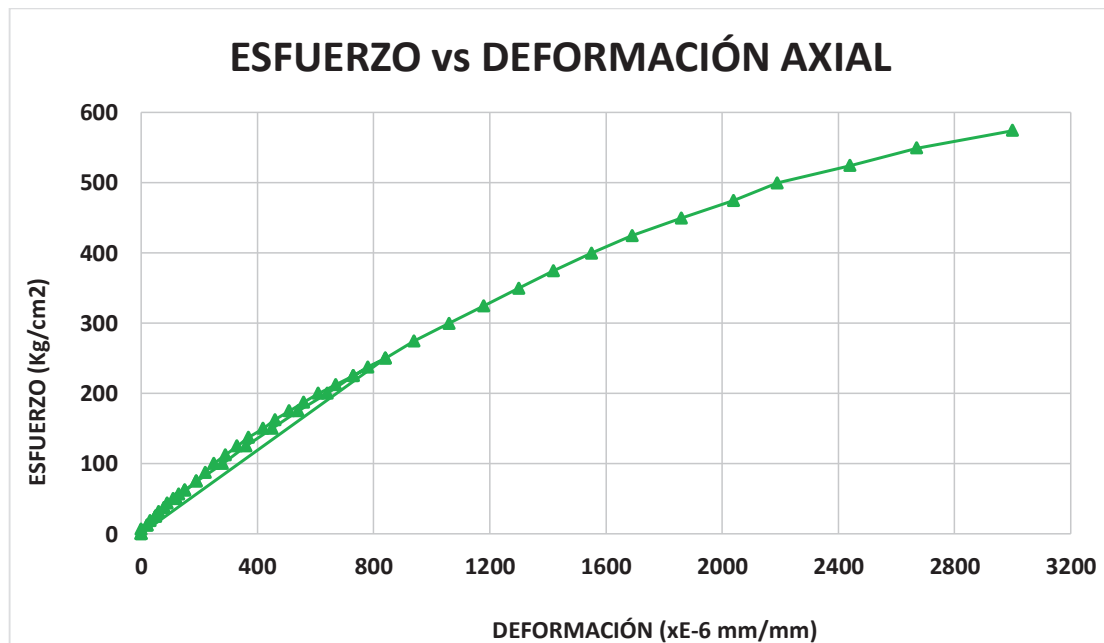
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.40 DATOS DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 8kg/m^3 .

MUESTRA:	M67
F. FABRICACIÓN:	26/09/2014
F. ENSAYO:	28/01/2015
EDAD:	124 días
φ :	10.1 cm
h :	20.15 cm
PESO:	3749.8 gr.
ÁREA:	80.12 cm^2
P. ESPEC.:	2.32 gr./cm^3

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.36 CURVA DE TODOS LOS CICLOS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 8kg/m^3



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 8kg/m³

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0,0	0	0,00
0,5	0	6,24
1,0	20	12,48
1,5	30	18,72
2,0	50	24,96
2,5	60	31,20
3,0	80	37,44
3,5	90	43,69
4,0	110	49,93
4,5	130	56,17
5,0	150	62,41
0	0	0,00
1	20	12,48
2	50	24,96
3	80	37,44
4	120	49,93
5	150	62,41
6	190	74,89
7	220	87,37
8	250	99,85
9	290	112,33
10	330	124,82
11	370	137,30
12	420	149,78
13	460	162,26
14	510	174,74
15	560	187,22
16	610	199,70
17	670	212,19
18	730	224,67
19	780	237,15
20	840	249,63
0	0	0,00
2	50	24,96
4	120	49,93
6	190	74,89
8	280	99,85
10	360	124,82
12	450	149,78
14	540	174,74
16	640	199,70
18	730	224,67
20	840	249,63
22	940	274,59
24	1060	299,56
26	1180	324,52
28	1300	349,48
30	1420	374,45
32	1550	399,41
34	1690	424,37
36	1860	449,33
38	2040	474,30
40	2190	499,26
42	2440	524,22
44	2670	549,19
46	3000	574,15
Carga Máxima =	46017	Kg
Módulo Elástico =	291556,6	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	574,36	Kg/cm ²

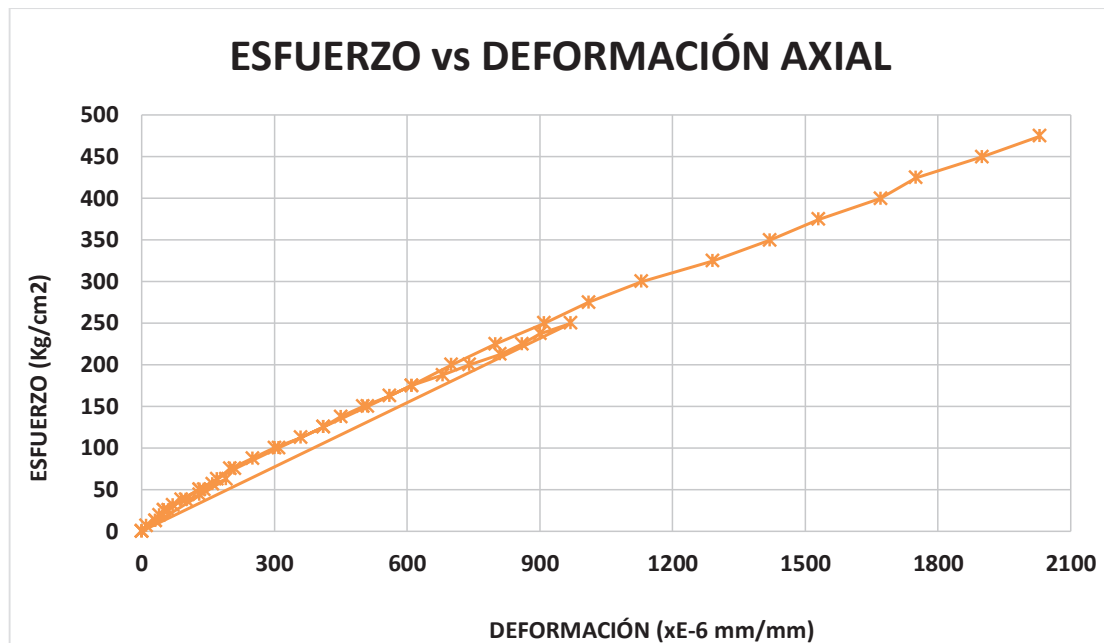
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.42 DATOS DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 12kg/m³.

MUESTRA:	M100
F. FABRICACIÓN:	29/09/2014
F. ENSAYO:	24/01/2015
EDAD:	117 días
φ :	10.1 cm
h :	20.2 cm
PESO:	3689.6 gr.
ÁREA:	80.12 cm ²
P. ESPEC.:	2.28 gr./cm ³

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.37 CURVA DE TODOS LOS CICLOS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN AXIAL DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 12kg/m³



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.43 RESULTADOS DEL ENSAYO DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA 12 kg/m³.

CARGA (T)	DEFORMACIÓN AXIAL (X 10 ⁻⁶)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0,00
0,5	10	6,24
1,0	30	12,48
1,5	40	18,72
2,0	50	24,96
2,5	70	31,20
3,0	100	37,44
3,5	130	43,69
4,0	140	49,93
4,5	160	56,17
5,0	190	62,41
0	0	0,00
1	30	12,48
2	60	24,96
3	90	37,44
4	130	49,93
5	170	62,41
6	200	74,89
7	250	87,37
8	300	99,85
9	360	112,33
10	410	124,82
11	450	137,30
12	500	149,78
13	560	162,26
14	610	174,74
15	680	187,22
16	740	199,70
17	810	212,19
18	860	224,67
19	900	237,15
20	970	249,63
0	0	0,00
2	50	24,96
4	130	49,93
6	210	74,89
8	310	99,85
10	410	124,82
12	510	149,78
14	610	174,74
16	700	199,70
18	800	224,67
20	910	249,63
22	1010	274,59
24	1130	299,56
26	1290	324,52
28	1420	349,48
30	1530	374,45
32	1670	399,41
34	1750	424,37
36	1900	449,33
38	2030	474,30
Carga Máxima =	39621	Kg
Módulo Elástico =	268742,2	Kg/cm ²
Esfuerzo Máximo =	494,53	Kg/cm ²

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

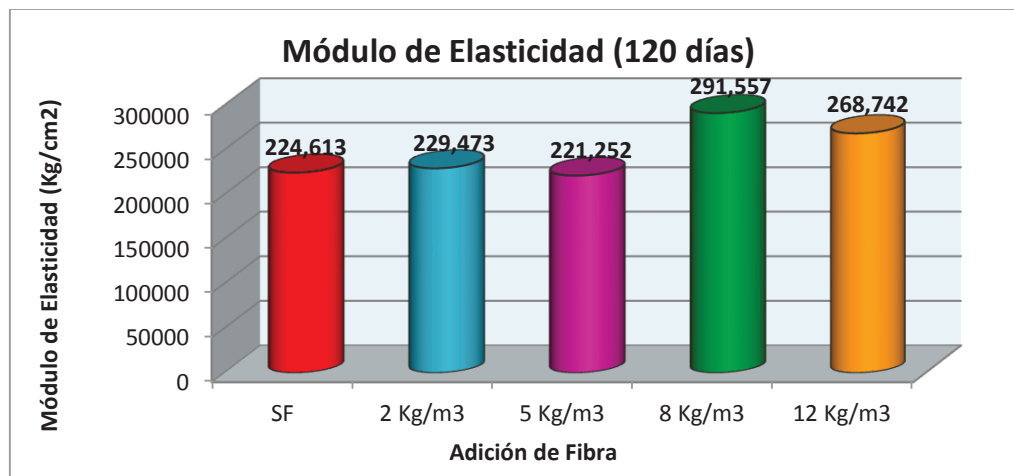
TABLA 6.44 RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYOS DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

AD. DE FIBRAS (Kg/m ³)	F'c Kg/cm ²	E Medido Kg/cm ²	E * Kg/cm ²
SF	518,77	224612,55	305684,4
2	571,45	229472,85	317412,2
5	504,00	221251,60	302291,7
8	574,36	291556,57	318043,5
12	494,53	268742,15	300088,8

* Valor obtenido con el ecuación 2.5

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.38 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL H.A.R., RESPECTO A LA ADICIÓN DE FIBRAS.



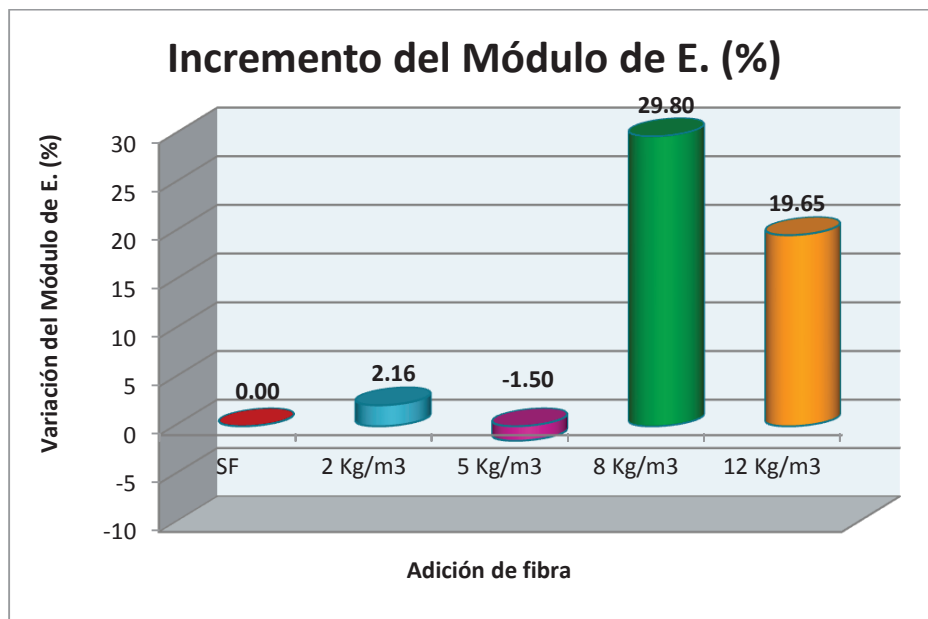
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.45 VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL H.A.R.,
DEBIDO A LA ADICIÓN DE FIBRA, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

ADICIÓN DE FIBRA	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	%
SF	224612,55	0,00
2 Kg/m ³	229472,85	2,16
5 Kg/m ³	221251,60	-1,50
8 Kg/m ³	291556,57	29,80
12 Kg/m ³	268742,15	19,65

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.39 VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL H.A.R, EN PORCENTAJE



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6.7 ANÁLISIS DE VARIABLES QUE PUEDEN AFECTAR AL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

TABLA 6.46 RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL H.A.R. CON ARENA DE M.F.=2.3 ARENA SIN LAVAR.

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F _c (Kg/cm ²)	PROM. F _c (Kg/cm ²)
1	SF1-1	01-sep-14	04-sep-14	3	10,2	20,1	3744,3	19,64	80,91	1626,37	2,30	242,78	254,36
2	SF1-2	01-sep-14	04-sep-14	3	10,2	20,1	3814,9	18,91	81,71	1642,43	2,32	231,38	
3	SF1-3	01-sep-14	04-sep-14	3	10,1	20,0	3716,7	21,31	80,12	1602,37	2,32	265,94	
4	SF1-4	01-sep-14	08-sep-14	7	10,1	20,1	3728,3	24,31	80,12	1606,38	2,32	303,40	318,70
5	SF1-5	01-sep-14	08-sep-14	7	10,1	20,1	3768,9	26,76	80,12	1610,38	2,34	333,99	
6	SF1-6	01-sep-14	08-sep-14	7	10,2	20,0	3777,8	18,35	81,71	1634,26	2,31	224,54	
7	SF1-7	01-sep-14	15-sep-14	14	10,2	20,2	3792,4	20,38	80,91	1634,46	2,32	251,84	358,05
8	SF1-8	01-sep-14	15-sep-14	14	10,2	20,0	3731,9	28,45	81,71	1634,26	2,28	348,16	
9	SF1-9	01-sep-14	15-sep-14	14	10,1	20,0	3744,8	29,19	79,33	1582,58	2,37	367,93	
10	SF1-10	01-sep-14	29-sep-14	28	10,1	20,1	3761,6	31,45	79,33	1590,51	2,37	396,51	380,97
11	SF1-11	01-sep-14	29-sep-14	28	10,1	20,0	3772,8	29,28	80,12	1602,37	2,35	365,42	
12	SF1-12	01-sep-14	29-sep-14	28	10,2	20,2	3859,0	25,40	81,71	1646,51	2,34	310,80	
13	SF1-13	01-sep-14	27-oct-14	56	10,2	20,1	3745,6	32,54	81,71	1642,43	2,28	398,24	404,59
14	SF1-14	01-sep-14	27-oct-14	56	10,2	20,0	3762,0	33,25	80,91	1618,27	2,32	410,94	
15	SF1-15	01-sep-14	27-oct-14	56	10,1	20,1	3366,6	23,44	80,12	1606,38	2,10	292,54	
16	SF1-16	01-sep-14	11-ene-15	132	10,1	20,1	3756,5	45,69	80,12	1610,38	2,33	570,33	570,33
17	SF1-17	01-sep-14	11-ene-15	132	10,2	20,0	3746,9	41,56	81,71	1634,26	2,29	508,65	

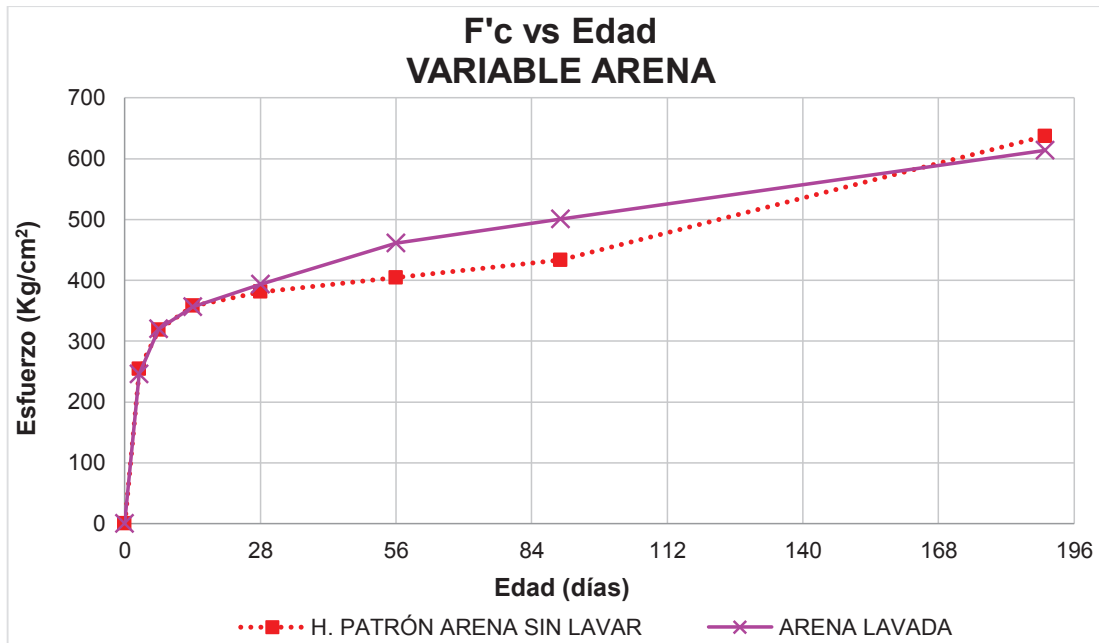
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.47 RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL H.A.R. CON ARENA M.F.=2.7 ARENA LAVADA.

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F _c (Kg/cm ²)	PROM. F _c (Kg/cm ²)
1	VAL-1	17/11/2014	20/11/2014	3	10,2	20,0	3871,9	19,941	81,71	1634,26	2,37	244,04	246,05
2	VAL-2	17/11/2014	20/11/2014	3	10,1	20,2	3784,2	19,875	80,12	1618,39	2,34	248,07	
3	VAL-3	17/11/2014	20/11/2014	3	10,2	20,1	3788,7	17,250	80,91	1626,37	2,33	213,19	
4	VAL-4	17/11/2014	24/11/2014	7	10,1	20,1	3836,6	21,377	80,12	1606,38	2,39	266,82	320,32
5	VAL-5	17/11/2014	24/11/2014	7	10,1	20,0	3788	24,666	80,12	1602,37	2,36	307,87	
6	VAL-6	17/11/2014	24/11/2014	7	10,1	20,0	3716,3	26,661	80,12	1598,36	2,33	332,77	
7	VAL-7	17/11/2014	01/12/2014	14	10,1	20,1	3781,6	28,87	80,12	1610,38	2,35	360,28	356,21
8	VAL-8	17/11/2014	01/12/2014	14	10,1	20,3	3870,5	25,74	80,12	1622,40	2,39	321,30	
9	VAL-9	17/11/2014	01/12/2014	14	10,1	20,0	3754,4	27,93	79,33	1586,54	2,37	352,14	
10	VAL-10	17/11/2014	15/12/2014	28	10,1	20,2	3886,5	33,26	80,12	1618,39	2,40	415,11	393,84
11	VAL-11	17/11/2014	15/12/2014	28	10,1	20,1	3796,4	31,81	80,12	1610,38	2,36	397,07	
12	VAL-12	17/11/2014	15/12/2014	28	10,1	20,1	3786,5	31,29	80,12	1610,38	2,35	390,60	
13	VAL-13	17/11/2014	12/01/2015	56	10,2	20,0	3845,0	35,228	81,71	1634,26	2,35	431,12	460,78
14	VAL-14	17/11/2014	12/01/2015	56	10,1	20,0	3779,4	32,438	80,12	1602,37	2,36	404,88	
15	VAL-15	17/11/2014	12/01/2015	56	10,0	20,0	3758,0	38,519	78,54	1570,80	2,39	490,44	
16	VAL-11	17/11/2014	26/05/2015	190	10,2	20,1	3793,7	48,899	81,71	1642,43	2,31	598,43	613,76
17	VAL-12	17/11/2014	26/05/2015	190	10,2	20,2	3794,7	51,405	81,71	1651,42	2,30	629,09	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.40 CURVA DEL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R, VARIABLE DE ARENA, EN FUNCIÓN DE LA EDAD.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.48 RESUMEN DE RESULTADOS DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL H.A.R. CON ARENA DE DIFERENTES M.F.

EDAD (Días)	F'c (Kg/cm2)	
	M.F.=2,3	M.F.=2,7
0	0	0
3	254,4	246,1
7	318,7	320,3
14	358,0	356,2
28	381,0	393,8
56	404,6	460,8
90	433,3	501,1
132	570,3	551,0

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Esta tabla contiene un resumen de las resistencias a ciertas edades; para las edades faltantes se han realizado interpolaciones, acordes a la tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión de los especímenes.

FIGURA 6.41 COMPARACIÓN DE PROBETAS MOLDEADAS CON ARENA LAVADA (IZQ.) Y CON ARENA EN ESTADO NATURAL



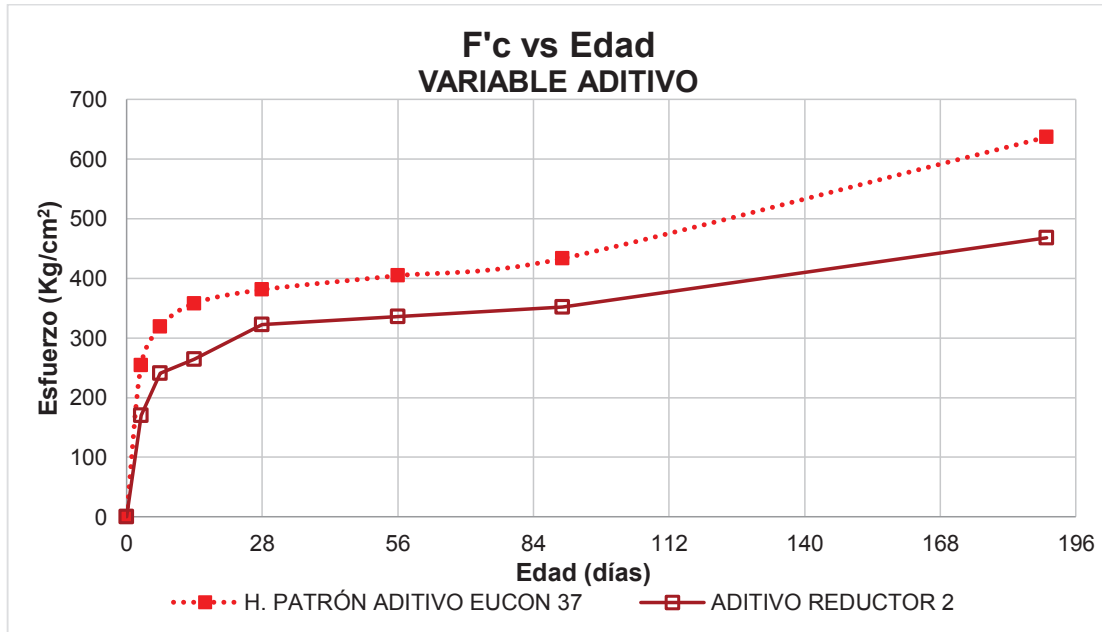
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.49 RESULTADOS ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN. ANALIZANDO LA VARIABLE ADITIVO.

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
1	VAD-1	18-nov-14	21-nov-14	3	10,1	20,2	3737,7	13,858	80,12	1614,39	2,32	172,97	170,53
2	VAD-2	18-nov-14	21-nov-14	3	10,2	20,2	3734,7	10,855	81,71	1650,60	2,26	132,84	
3	VAD-3	18-nov-14	21-nov-14	3	10,1	20,1	3724,6	13,467	80,12	1610,38	2,31	168,09	
4	VAD-4	18-nov-14	25-nov-14	7	10,2	20,0	3775,6	19,068	81,71	1630,17	2,32	233,35	240,68
5	VAD-5	18-nov-14	25-nov-14	7	10,1	20,1	3724	19,673	79,33	1590,51	2,34	248,00	
6	VAD-6	18-nov-14	25-nov-14	7	10,1	20,0	3725,7	17,962	80,12	1602,37	2,33	224,19	264,25
7	VAD-7	18-nov-14	02-dic-14	14	10,2	19,9	3781,7	23,114	81,71	1626,09	2,33	282,87	
8	VAD-8	18-nov-14	02-dic-14	14	10,1	20,1	3742,6	18,931	80,12	1610,38	2,32	236,29	
9	VAD-9	18-nov-14	02-dic-14	14	10,1	20,0	3733,3	19,679	80,12	1602,37	2,33	245,62	
10	VAD-10	18-nov-14	16-dic-14	28	10,1	20,1	3758	25,421	79,33	1590,51	2,36	320,46	
11	VAD-11	18-nov-14	16-dic-14	28	10,1	20,0	3720,7	25,989	80,12	1602,37	2,32	324,38	322,42
12	VAD-12	18-nov-14	16-dic-14	28	10,0	19,9	3744	29,451	78,54	1562,94	2,40	374,98	335,81
13	VAD-13	18-nov-14	13-ene-15	56	10,1	20,1	3733,1	24,367	80,12	1610,38	2,32	304,14	
14	VAD-14	18-nov-14	13-ene-15	56	10,1	20,0	3714,4	25,462	79,33	1586,54	2,34	320,97	
15	VAD-15	18-nov-14	13-ene-15	56	10,1	19,9	3720,1	28,093	80,12	1594,36	2,33	350,64	466,79
16	VAD-16	18-nov-14	26-may-15	189	10,2	20,1	3719,2	38,614	81,71	1642,43	2,26	472,56	
17	VAD-17	18-nov-14	26-may-15	189	10,2	20,2	3773,9	37,671	81,71	1650,60	2,29	461,02	

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.42 CURVA DEL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R, VARIABLE DE ADITIVO, EN FUNCIÓN DE LA EDAD.



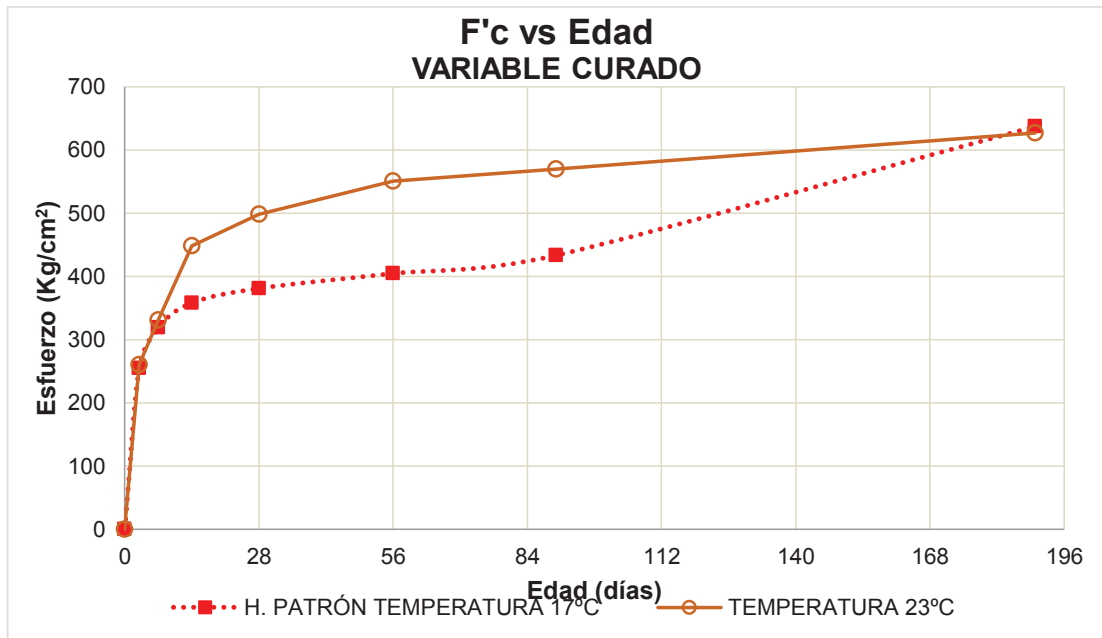
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.50 – RESULTADOS ESFUERZOS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN. ANALIZANDO LA VARIABLE TEMPERATURA DE CURADO.

N°	IDENT.	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA ENSAYO	EDAD (días)	ϕ (cm)	h (cm)	PESO (gr)	CARGA (Ton)	ÁREA (cm ²)	VOL. (cm ³)	PESO ESP. (T/m ³)	F'c (Kg/cm ²)	PROM. F'c (Kg/cm ²)
1	VC-1	28/11/2014	01/12/2014	3	10,1	20,1	3746,3	16,813	80,12	1610,38	2,33	209,85	259,79
2	VC-2	28/11/2014	01/12/2014	3	10,1	20,0	3727,7	19,706	79,33	1586,54	2,35	248,41	
3	VC-3	28/11/2014	01/12/2014	3	10,1	19,9	3736,6	21,725	80,12	1594,36	2,34	271,16	
4	VC-4	28/11/2014	05/12/2014	7	10,3	20,0	3816,5	26,405	83,32	1662,29	2,30	316,90	330,96
5	VC-5	28/11/2014	05/12/2014	7	10,2	20,3	3775,1	22,673	81,71	1654,68	2,28	277,47	
6	VC-6	28/11/2014	05/12/2014	7	10,2	20,2	3737,8	28,192	81,71	1646,51	2,27	345,01	
7	VC-7	28/11/2014	12/12/2014	14	10,2	20,2	3773,6	35,327	81,71	1650,60	2,29	432,33	448,17
8	VC-8	28/11/2014	12/12/2014	14	10,2	20,3	3803,1	27,357	81,71	1654,68	2,30	334,79	
9	VC-9	28/11/2014	12/12/2014	14	10,2	20,0	3766,1	37,915	81,71	1634,26	2,30	464,00	
10	VC-10	28/11/2014	26/12/2014	28	10,1	20,1	3784,2	32,724	80,12	1610,38	2,35	408,45	498,06
11	VC-11	28/11/2014	26/12/2014	28	10,2	20,1	3747,7	39,874	81,71	1642,43	2,28	487,98	
12	VC-12	28/11/2014	26/12/2014	28	10,2	20,1	3839,1	41,522	81,71	1642,43	2,34	508,15	
13	VC-13	28/11/2014	23/01/2015	56	10,1	20,0	3685,5	43,250	80,12	1602,37	2,30	539,83	550,62
14	VC-14	28/11/2014	23/01/2015	56	10,0	20,1	3711,2	44,001	78,54	1578,65	2,35	560,24	
15	VC-15	28/11/2014	23/01/2015	56	10,1	20,1	3691,2	44,980	80,12	1610,38	2,29	561,42	
16	VC-16	28/11/2014	26/05/2015	179	10,2	20,1	3725	50,699	81,71	1642,43	2,27	620,45	620,45

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.43 CURVA DEL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R, VARIABLE TEMPERATURA DE CURADO EN FUNCIÓN DE LA EDAD.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.51 – RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS VARIABLES ANALIZADAS.

Edad	RESISTENCIA (kg/cm ²)			
	H. PATRÓN	ARENA	ADITIVO	CURADO
0	0	0	0	0
3	254,36	246,05	170,53	259,79
7	318,70	320,32	240,68	330,96
14	358,05	356,21	264,25	448,17
28	380,97	393,84	322,42	498,06
56	404,59	460,78	335,81	550,62
90	433,28	501,10	352,21	569,93
190	637,09	613,76	467,68	626,70

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.45 PROBETAS MOLDEADAS CON ARENA LAVADA (ESQ. SUP. IZQ.), ADITIVO FLUIDIFICANTE (ESQ. SUP. DER.) Y PARA CONTROL DE TEMPERATURA DE CURADO.



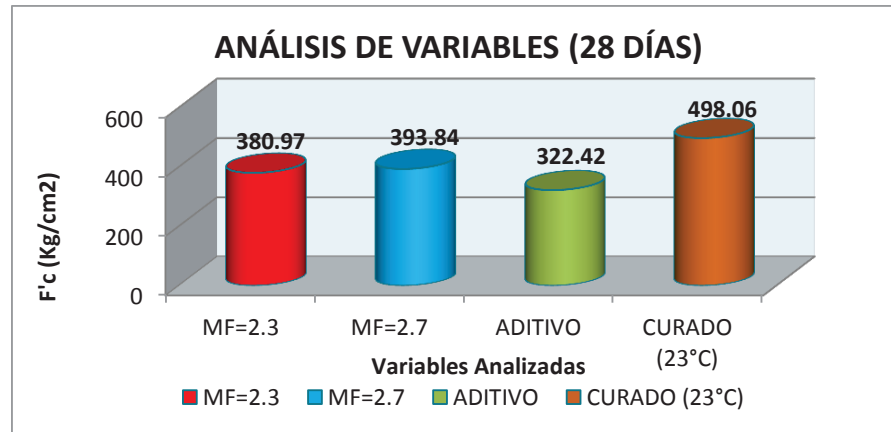
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.52 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R. A LOS 28 DÍAS, EN DIFERENTES VARIABLES, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

VARIBALE	28 DÍAS	
	F'c (Kg/cm ²)	%
MF=2.3	380,97	0,00
MF=2.7	393,84	3,38
ADITIVO	322,42	-15,37
CURADO (23°C)	498,06	30,74

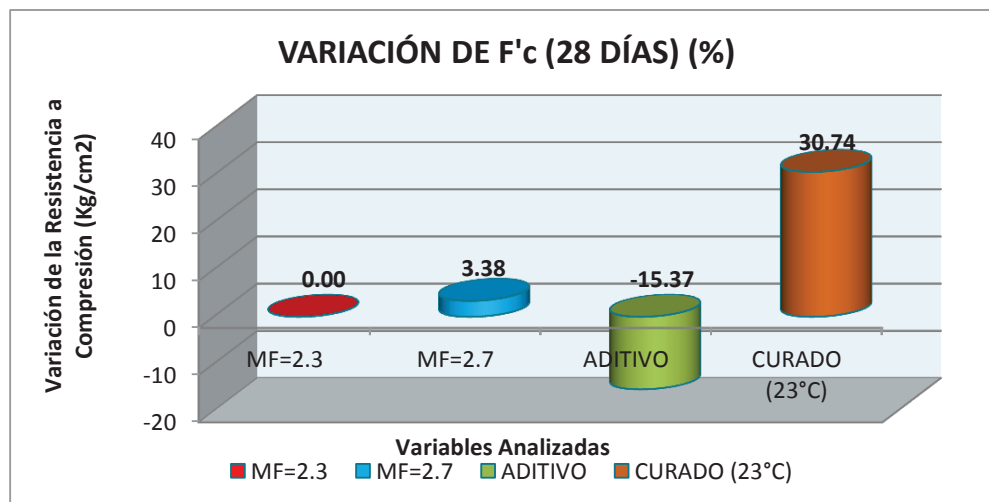
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.46 GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES VARIABLES, A LA EDAD DE 28 DÍAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.47 VARIACIÓN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R A LOS 28 DÍAS, EN DIFERENTES VARIABLES DE ANÁLISIS, EXPRESADA EN PORCENTAJE



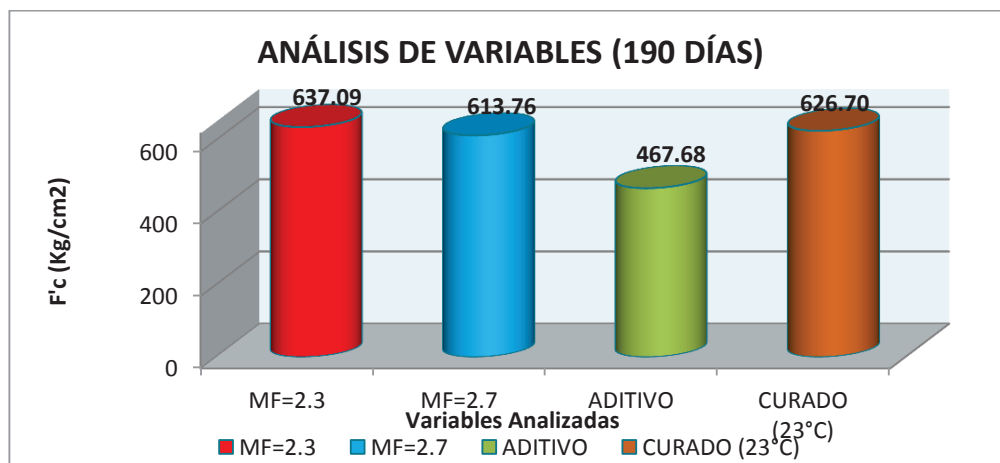
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.53 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R. A LOS 190 DÍAS, EN DIFERENTES VARIABLES, EXPRESADA EN PORCENTAJE.

190 DÍAS		
VARIABLE	F'c (Kg/cm ²)	%
MF=2.3	637,09	0,00
MF=2.7	613,76	-3,66
ADITIVO	467,68	-26,59
CURADO (23°C)	626,70	-1,63

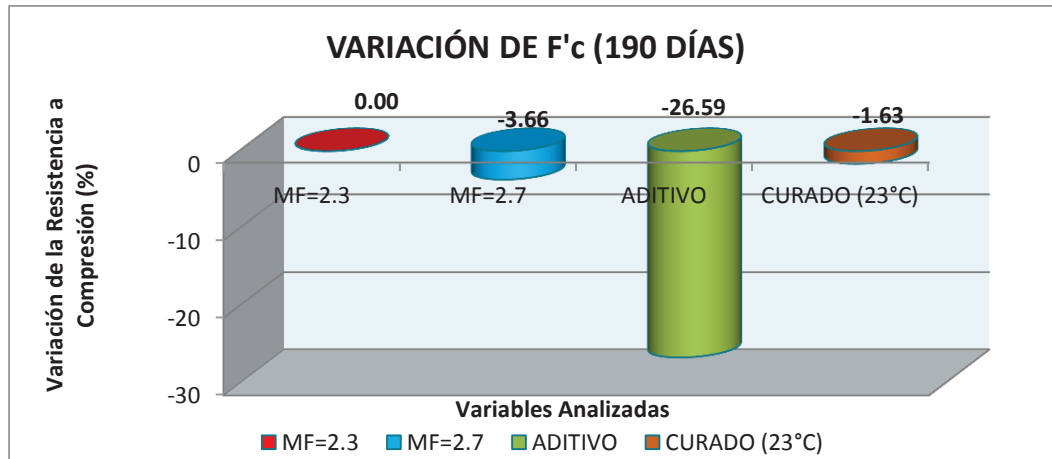
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.48 GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES VARIABLES, A LA EDAD DE 190 DÍAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.49 VARIACIÓN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL H.A.R A LOS 190 DÍAS, EN DIFERENTES VARIABLES DE ANÁLISIS, EXPRESADA EN PORCENTAJE



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

Las variaciones que muestran las figuras 6.47 y 6.49 a los 28 y 190 días respectivamente, evidencian que a edad temprana la diferencia se presenta significativa, en cuanto se refiere a arena lavada, curado y el hormigón patrón utilizado, sin embargo a edades mayores se puede recuperar este tipo de deficiencias prácticas, llegando la resistencia a compresión, prácticamente a ser la misma a la edad de 190 días.

En lo que se refiere a la variable aditivo, se puede observar que el aditivo EUCON37 utilizado en las mezclas de esta investigación funciona mejor que el aditivo Reductor 2; al ser el primero de ellos el que se empleó efectivamente, se descarta que esta sea un factor que afecte el rendimiento del H.A.R.

6.8 RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE FIBRA ADICIONADA Y EL ASENTAMIENTO.

Las variaciones de la relación a/c afectan directamente al asentamiento, las cuales se presentan debido a varios factores, algunos de los principales se listan a continuación: por condiciones climáticas del día en que se realizó la fundición,

por condiciones del equipo utilizado en el proceso de mezclado, contaminación, tiempo de mezclado, humedad de los agregados, etc.

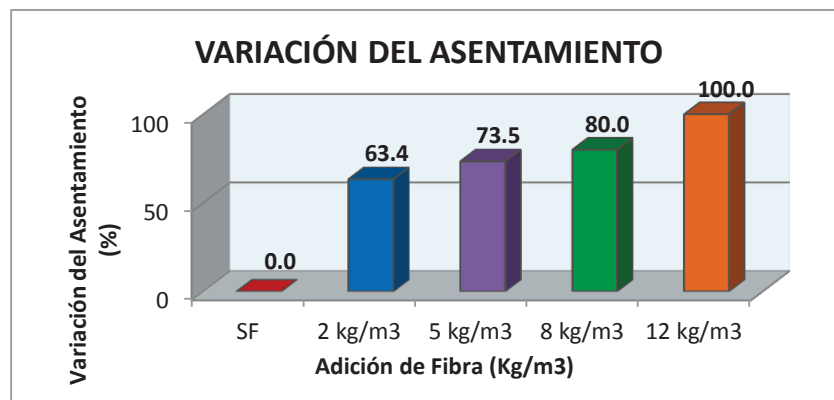
A pesar que en la práctica no se pueden controlar totalmente estos factores, sin embargo, en las dosificaciones realizadas en esta investigación se trató mantener un asentamiento entre 2.5 a 5 cm, tal como indica el ACI 211.4R, para la realización de hormigones de alta resistencia dosificados con aditivo HRWR.

TABLA 6.54 VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN H.A.R. CON ADICIÓN DE FIBRAS.

Adición de Fibra (Kg/m ³)	Asentamiento (cm)		%Asentamiento perdido
	Antes de Adición	Después de Adición	
SF	4,1	4,1	0,0
2 Kg/m ³	4,1	1,5	63,4
5 Kg/m ³	3,4	0,9	73,5
8 Kg/m ³	2,5	0,5	80,0
12 Kg/m ³	2,5	0	100,0

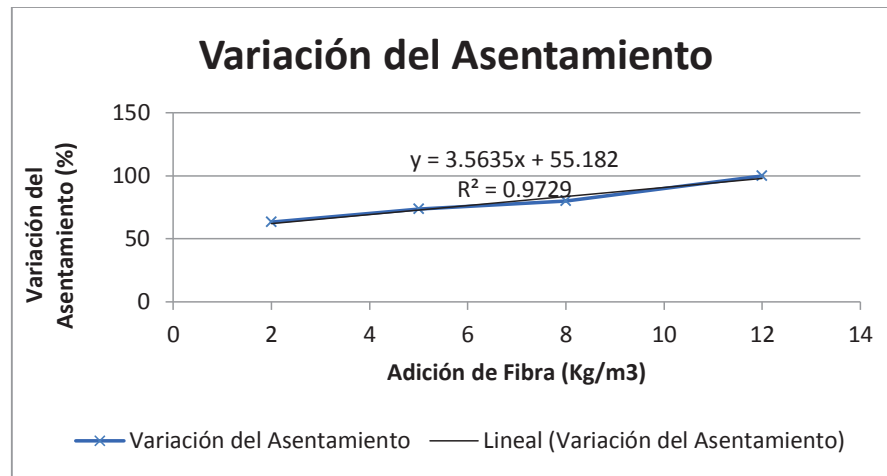
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.50 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO EN H.A.R CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.51 CURVA DE PÉRDIDA DEL ASENTAMIENTO POR ADICIÓN DE FIBRAS.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

De la figura 6.51 se ha obtenido el valor de la pérdida (Delta) del asentamiento debido al incremento de peso de fibras añadidas, como la pendiente de la línea de tendencia para 1 Kg/m³ de adición de la fibra.

Pérdida de Asentamiento por cada Kg/m³ de fibra (Delta): 3.56 %/(Kg/m³).

Es decir que se pierde 3.6% de asentamiento por cada kg de fibra que se adicione para 1 m³ de hormigón.

6.9 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE COSTOS ENTRE MEZCLAS DE H.A.R CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRAS.

TABLA 6.55 COSTO DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN EL H.A.R, POR CADA METRO CÚBICO.

COSTO DE LOS MATERIALES / m³ (SIN IMPUESTOS)			
MATERIAL	PESO (Kg)	%	\$/m³
AGUA	217,6	9,3	0,13
CEMENTO	394,1	16,8	70,62
PIEDRA	1035,7	44,3	11,91
ARENA	692,5	29,6	4,47
EUCON 37-ADITIVO	5,91	1,5	11,27
TOTAL:			98,41

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.56 COSTO DE LAS FIBRAS SINTÉTICAS TUF STRAND SF, POR CADA METRO CÚBICO DE HORMIGÓN.

COSTO DE TUF STRAND SF-FIBRA/m³	
CANTIDAD (Kg/m³)	\$/m³
0	0.00
2	19.72
5	49.29
8	78.86
12	118.30

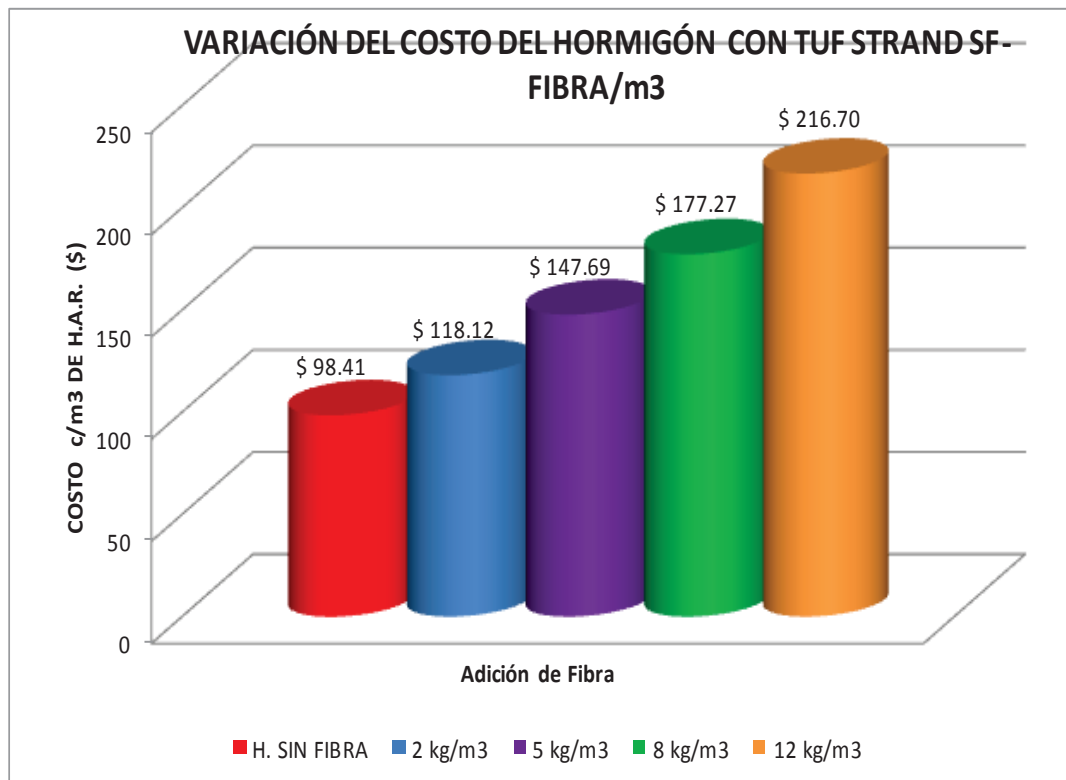
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.57 COSTO POR METRO CÚBICO DE H.A.R CON ADICIÓN DE FIBRA.

COSTO DEL HORMIGÓN CON TUF STRAND SF-FIBRA/m³			
CANTIDAD FIBRA (Kg/m³)	MATERIALES (\$)	FIBRA(\$)	COSTO TOTAL(\$)
0	98,41	0,00	98,41
2	98,41	19,72	118,12
5	98,41	49,29	147,69
8	98,41	78,86	177,27
12	98,41	118,30	216,70

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.52 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL COSTO DEL H.A.R CON Y SIN ADICIÓN DE FIBRA.



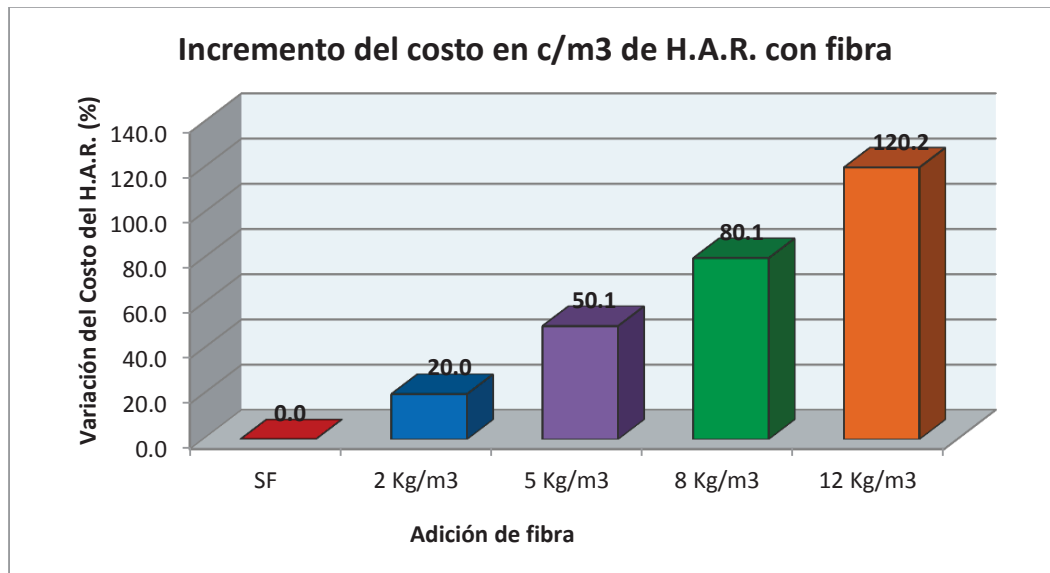
Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.58 VARIACIÓN DEL COSTO DEL H.A.R, DEBIDO AL INCREMENTO DE FIBRA.

Cantidad de Fibra	FIBRA (\$/m ³)	H.A.R con fibra (\$/m ³)	INCREMENTO DEL COSTO (%)
SF	0,00	98,41	0,0
2 Kg/m ³	19,72	118,12	20,0
5 Kg/m ³	49,29	147,69	50,1
8 Kg/m ³	78,86	177,27	80,1
12 Kg/m ³	118,30	216,70	120,2

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

FIGURA 6.53 VARIACIÓN DEL COSTO DEL H.A.R EN CADA ADICIÓN DE FIBRA.



Elaborado por: Fanny G., Julia P.

TABLA 6.59 RESUMEN GENERAL DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL H.A.R., EXPRESADA EN PORCENTAJE (%).

CARACTERÍSTICAS	Adición de fibra (Kg/m ³)				
	SF	2	5	8	12
R. Compresión	0	6,2	-4,4	0,2	-24,3
R. Flexotracción	0	3,5	7,2	6,7	2,7
R. Corte	0	11,8	14,8	32,5	35,2
Módulo	0	2,2	-1,5	29,8	19,6
Tenacidad*	0	-8,8	-9,7	2,1	-40,5
Costo	0	20,0	50,1	80,1	120,2

Elaborado por: Fanny G., Julia P.

6.10 CONCLUSIONES.

- Del análisis a los agregados de la mina Fucusucu - San Antonio en la Mitad del Mundo para agregado Fino, y de la mina de la empresa Holcim en Pifo para agregado grueso, usados en el estudio del H.A.R. (L., Guadalupe, Gallegos, 2009), y la presente investigación (2015) que usó los agregados de las mismas fuentes, se puede evidenciar que los parámetros físicos de estos materiales pétreos presentan variaciones en este tiempo, que se muestran en la siguiente tabla:

PARÁMETROS FÍSICOS	AÑO		OBSERVACIÓN
	2009	2015	
AGREGADO GRUESO			
MF	***	5,96	No cumple gradación de acuerdo a la NTE INEN 872, se muestra una grava más fina con curva granulométrica con tendencia fina. Ver figura 5.5
DENSIDAD COMPACTADA (Kg/m³)	1413	1486	La mala gradación y la forma angular de las partículas incrementa el contenido de vacíos ocasionando que el valor de densidad compactada aumente.
DSSS (Kg/m³)	2575	2582	Con el incremento de grava fina aumenta también el área efectiva, por lo tanto se eleva el valor de esta propiedad.
ABSORCIÓN (%)	3,20	2,49	Grava extraída en el año 2015 con menor presencia de poros
AGREGADO FINO			
MF	2,60	2,34	El extremo inferior de la curva granulométrica no cumple la gradación de acuerdo a la NTE INEN 872, lo que implica una arena con más contenido de finos. Ver figura 5.19
DENSIDAD COMPACTADA (Kg/m³)	1753	1723	
DSSS (Kg/m³)	2558	2553	Debido a la presencia de polvo habrá mayor demanda de agua ya que aumenta la superficie a mojar.
ABSORCIÓN (%)	4,53	4,54	

Es importante anotar que los parámetros físicos de los áridos extraídos, de las minas mencionadas, pudieron haber sufrido cambios en su constitución, debido a que el manto rocoso no es homogéneo, presentando variación en sus estratos.

- El uso de arena con M.F. de 2.3, para aplicaciones particulares o con hormigones convencionales es considerado adecuado, pero en cuanto a hormigones de alta resistencia se refiere no resulta óptima, ya que el alto contenido de finos, según el ACI 211.4R, disminuye la trabajabilidad y obliga al incremento de agua, por lo tanto al aumento de la relación a/c , y disminución consecuente de la resistencia a compresión.
- Con referencia a la Tesis de H.A.R., (L.,Guadalupe, Gallegos, 2009) en la que se recomienda el uso de estos agregados y que sirvieron como base para este estudio, además que son los áridos que se comercializan actualmente, se decidió continuar trabajando con dichos materiales; adicionalmente, bajo el argumento de la norma 872 para requisitos de gradación, numerales 5.1.2.3 de árido fino y 5.2.2 para árido grueso, aclaran que si se realizan ensayos previos en los que se prueben que los agregados sirven en el hormigón constituido se podrá aprobar su uso.
- El porcentaje de aditivo EUCON 37, con su función de reductor de agua de alto rango, usado en este proyecto es del 1.5% respecto al peso del cemento. Porcentaje que resultó adecuado para las mezclas de prueba realizadas con el fin de evaluar su comportamiento, el cual dio mejor trabajabilidad, con menor cantidad de agua, además de resistencias a compresión más altas, respecto a los cilindros moldeados con mezclas de porcentajes más bajos (Ver Figuras 4.14 y 4.15)
- Las mezclas para este tipo de hormigón requieren usar una relación a/c baja, pero es importante aclarar que esta relación no debe ser menor que la consistencia normal del cemento cuyo valor es 0.289. En esta investigación se utilizó de forma permanente una relación de 0.38, adecuada para un hormigón de resistencia de 500 Kg/cm² (Ver dosificaciones en el Capítulo 4 y Tabla 5.22). Dicha relación fue posible obtener con el complemento del aditivo superplastificante y reductor de agua de alto rango.

- En cada una de las mezclas se procuró mantener la consistencia del hormigón mediante la determinación del asentamiento, y su posterior evaluación en la mezcla con adición de fibra, por medio del cono de Abrams. Como se puede apreciar en la Tabla 6.54 y Figura 6.50, para una mezcla normal de H.A.R se mantiene un asentamiento entre 2.5 a 5.0 cm, el cual disminuye dependiendo de la adición de fibras correspondiente, pudiendo llegar a ser cero (0 cm).
- Con referencia al acápite 3.1.4 del ACI 211.4R, el cual recomienda usar agregados limpios y en particular el empleo de arenas con módulos de finura en el rango de 2.5 a 3.2, se procedió realizar una comparación de la variación de resistencia a compresión con base a la eliminación de los finos de la arena por medio del lavado. Obteniendo una mejoría sustancial en la trabajabilidad de la mezcla, ya que ésta se presenta más dócil y manejable, además el proceso de la compactación implica un menor esfuerzo, lo cual corrobora el valor de la recomendación.
- De las características de la Piedra depende en gran medida la resistencia del Hormigón, en este proyecto se ha podido visualizar la particularidad de que en el ensayo a compresión las piedras se rompen, resultando en una falla o fractura de cizalla o un tajo en la probeta, significando esto que es la piedra la que falla antes que la matriz, entendiéndose por tanto, que la pasta es lo suficientemente fuerte para la sujeción de la piedra y aporta a la resistencia a compresión del hormigón. Generalmente este tipo de fallas se dan en ensayos a cortante o cuando se induce a la probeta a una tracción diametral.
- Al someter a un espécimen cilíndrico fabricado con H.A.R. a un esfuerzo de compresión, se genera una falla frágil, con el desprendimiento de fragmentos de hormigón que salen despedidos en diferentes direcciones. La adición de fibra en estas mezclas, ayuda a que estos fragmentos se mantengan unidos y permite una mayor deformación a medida que incrementa la aplicación de la carga, generando ductilidad en el producto.

Este proyecto realizó un análisis de las variaciones en las propiedades mecánicas de los H.A.R. bajo la influencia de la adición de fibras sintéticas, obteniendo así las siguientes conclusiones:

- La consistencia del hormigón sufre una pérdida de asentamiento o menor trabajabilidad ocasionado por la adición de fibras (Ver Tabla 6.54). En consecuencia el control de la relación a/c, mediante el cono de Abrams, no es posible.
- Las fibras sintéticas utilizadas no incrementan la resistencia del hormigón, su comportamiento es aproximadamente el mismo, con una oscilación máxima de hasta el 7%, a excepción de las probetas mezcladas con adición de fibra de 12 Kg/m³ de hormigón, con la cual la resistencia disminuye en aproximadamente el 25%, ya que se originan poros excesivos que redundan en una afectación de la resistencia de diseño (Ver Tabla 6.6 y Figura 6.8).
- Las probetas fundidas con fibra, muestran un comportamiento similar al patrón hasta los 14 días, en lo que se refiere a desarrollo de resistencia a compresión con el incremento de su edad. Después de este período de tiempo, el desarrollo de resistencia no es muy significativo, pero en este tipo de hormigones y de acuerdo a la literatura técnica, es prudente esperar períodos mayores de tiempo para la comprobación de la resistencia, dichos periodos pueden ser de 56, 91 días hasta un año. En este estudio, la edad de diseño de las mezclas realizadas es de 28 días, pero como se evidencia en los ensayos de compresión la resistencia máxima conseguida en esa edad es de aproximadamente 400 Kg/cm², siendo la esperada de 500 Kg/cm², lo que no necesariamente indica que el diseño esté mal realizado. Los testigos almacenados, para ser ensayados a edades superiores a los 90 días, reflejan que la resistencia a compresión sigue subiendo a medida que incrementa la edad del hormigón. Los especímenes ensayados a edades superiores a los 100 días llegan a esfuerzos superiores a 500 kg/cm². (Ver Tabla 6.6).

- En los ensayos realizados se ha evidenciado que el mejor comportamiento para flexotracción, se consigue con adición de fibras de 5 Kg/m^3 de hormigón con un incremento aproximado del 7% de la resistencia a flexotracción, respecto a un hormigón de alta resistencia sin adición de fibra; la mezcla es trabajable y de fácil compactación, sin embargo el costo asciende al 50% más del valor considerado para un H.A.R sin adiciones de fibra. (Ver Tablas 6.14 y 6.57).
- Los ensayos de resistencia a flexotracción presentan un mejor comportamiento respecto a los niveles teóricos obtenidos a partir de la ecuación 2.14, cuyos valores se presentan en la tabla 2.1.
- En lo que se refiere al ensayo de resistencia a Cortante, se observa claramente que el hormigón muestran mejor comportamiento mientras mayor es la cantidad de adición de fibra, pero es notable además el incremento sustancial del costo del H.A.R., llegando a ser el incremento de esta propiedad respecto al hormigón patrón, de aproximadamente 35% con una adición de fibra de 12 Kg/m^3 de hormigón y a la vez su costo se eleva a 120 % del valor para un H.A.R sin adición de fibra (Ver Tabla 6.2, Figuras 6.24 y 6.52).
- Los valores de Tenacidad no arrojan resultados concluyentes, debido a que se han calculado en base a la carga última y no a la de rotura como exige el ensayo, esto debido a la falta del equipo apropiado para su determinación; siendo aun así y en base a estos resultados el valor relativamente más alto el del tercer porcentaje, 8 kg/m^3 , mostrando un 2% de mejoría en la tenacidad respecto al patrón o espécimen sin fibra. Valor que carece de confiabilidad al considerar solamente el rango elástico para su determinación, siendo indispensable analizar su rango inelástico o plástico. (Ver Tabla 6.33 y Figura 6.32).
- Los ensayos de módulos de elasticidad fueron realizados para probetas de edades mayores a los 100 días, debido a que a esta edad se consigue la resistencia de diseño, que para este proyecto es de 500 Kg/cm^2 . Los

módulos obtenidos teóricamente proporcionan valores de alrededor de 320 a 350 mil Kg/cm², por el contrario los resultados de los ensayos arrojaron valores de alrededor de 220 a 300 mil Kg/cm². Dichos resultados se justifican en base a la variable "agregados", ya que las ecuaciones y demás teoría han sido fruto de los estudios realizados en agregados de otros países, con características mecánicas diferentes. (Ver Tabla 6.45 y Figura 6.39)

- La adición de fibra en el H.A.R, que mejor comportamiento presentó en módulos de elasticidad es la de 8 Kg/m³ de hormigón, dando como resultado un incremento del 30% respecto al H.A.R. patrón (Ver Tabla 6.50 y Figura 6.39).
- En cuanto a la mezcla con adición de 12 Kg/m³, tiene una mejoría del 20% respecto a la probeta patrón, presentando un valor de 268742 kg/cm². Sin embargo este mismo valor decrece respecto a la tercera cantidad de adición, por las porosidades que presenta la probeta debido a la gran cantidad de fibra con la que se fabrica. (Ver Tablas 6.44 y Figura 6.39).
- Las fibras contribuyen a evitar la retracción por fraguado, retracción plástica debido a agentes climáticos como sol y viento. Condiciones que se presentan de forma importante en pisos industriales o aquellas obras que requieren de superficies continuas.

Las variables que se han considerado y analizado en esta investigación como adversas para el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón, son Agregado Fino, Tipo de Aditivo y Temperatura de Curado de las cuales se concluye lo siguiente:

- Los resultados de los cilindros moldeados con arena lavada, cuyo Módulo de Finura asciende a 2.7, en lugar de arena en estado natural con Módulo de Finura de 2.3, muestran mejor comportamiento y tendencia de desarrollo de la resistencia en todas sus edades. Pero es notable que la mezcla patrón con arena natural, presenta un nuevo desarrollo a edades finales, incluso

obteniendo mayor resistencia que la de arena lavada (Ver Figuras 6.40 y Tabla 6.48). Sin embargo, es importante aclarar que el agregado Fino, de MF de 2.7, produce una mezcla de mejor trabajabilidad.

- El uso del aditivo alternativo “REDUCTOR 2”, no produjo resultados adecuados, o valores de resistencia mayores a los del aditivo seleccionado para este proyecto, por lo que esta variable se descarta con fundamento en la resistencia a compresión obtenida que es de 322.42 kg/cm² a los 28 días y de 335.81 kg/cm² a los 56 días. (Ver Tabla 6.51).
- La temperatura de curado es importante para mejorar la reacción química del cemento y permitir el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón, la norma NTE INEN 1576, recomienda temperaturas de 21 a 23 °C, pero las condiciones ambientales de Quito no permiten estos rangos en obra. Para analizar esta variable se moldearon especímenes procurando mantener las mismas condiciones de las primeras mezclas y curado en agua con temperatura dentro del rango establecido en la norma, las cuales presentan mejores resultados que aquellos que son curados en agua a condiciones ambientales de Quito (17°C), como se puede evidenciar en la Figura 6.43 y Tabla 6.51. En las cuales se muestran que los valores alcanzados por los especímenes bajo curado controlado, llegan a cargas de 40 Toneladas, representando estos valores esfuerzos de 500 Kg/cm², a 28 días de edad.

6.11 RECOMENDACIONES.

- Con objeto de control de variables en las mezclas de H.A.R., se considera indispensable mantener regulares las condiciones de humedad de los agregados, por lo que se recomienda que para trabajos en laboratorio los materiales sean sometidos a un proceso de secado, en horno a 110°C por un período de 24 horas.
- Debido al alto contenido de cemento en este tipo de mezclas se recomienda usar un aditivo que retarde el tiempo de fraguado, ya que este proceso inicia con mayor rapidez, en un rango de 10 a 15 minutos, y su remezclado resulta más complicado con el transcurso del tiempo.
- El H.A.R. diseñado en esta investigación, muestra un desarrollo de la curva de crecimiento de resistencia a la Compresión vs la edad del hormigón, diferente a la convencional, debido a que con edades mayores a los 56 días presenta un nuevo crecimiento de la resistencia, situación que va más allá del análisis de este estudio, por lo que se recomienda continuar con una nueva investigación que analice las razones que motivan este comportamiento.
- Es aconsejable en cada mezcla prever la fabricación de mínimo dos probetas adicionales, para disponer de especímenes de apoyo en el caso de algún suceso desventajoso que invalide algún ensayo u ocasione el daño o deterioro de la probeta.
- Para obtener resultados confiables, es adecuado ensayar como mínimo dos probetas fabricadas de la misma mezcla; es decir que se contará con valores más precisos y exactos mientras más probetas sean ensayadas para una misma edad o condición.

- La adición de fibras en el hormigón, reduce el asentamiento, lo que hará al hormigón menos trabajable, por lo que es recomendable diseñarlo con un asentamiento mínimo de 10 cm, lo que implica el uso de un hiperplastificante.
- Es aconsejable hacer que el hormigón sea reoplástico es decir que éste adquiera el asentamiento máximo sin segregar sus agregados.
- La alineación de las probetas en la máquina de compresión, durante el ensayo es importante para que la carga que se le aplica se distribuya uniformemente en el espécimen, evitando así excentricidades que pueden ocasionar la falla prematura de la probeta. Se recomienda un control minucioso en los detalles que las normas exponen para la ejecución de ensayos
- Se recomienda continuar con el estudio de este tipo de hormigones, haciendo énfasis en la medición de los módulos de elasticidad y el desempeño de la tenacidad en los rangos plásticos.
- Se recomienda profundizar el estudio del comportamiento del hormigón de alta resistencia o bajas relaciones de agua-cemento, con la influencia de diferentes tipos de aditivos que puedan mejorar las condiciones adversas que se han anotado en este trabajo: dificultades en trabajabilidad y disminución de los tiempos iniciales de fraguado.
- Se recomienda emprender un estudio respecto a la influencia de la temperatura de curado de los hormigones, de manera que se consideren las condiciones reales de la mayoría de obras civiles que se ejecutan en el país.

6.12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- American Society for Testing Materials, *Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. (ASTM C 192 / 192M - 13a)
- American Society for Testing Materials, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression* (ASTM C 469 / C 469 M - 14).
- Arequipa, E., Coba, W., Garzón, D., Vargas, L. (2012). *Módulo Estático de Elasticidad del Hormigón en base a su Resistencia a la Compresión Simple $f'_c = 21 \text{ MPa}$ y 30 MPa* . Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio*. (UNE 83504).
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Refrentado de probetas con mortero de azufre*. (UNE 83506)
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Hormigones con Fibras, Rotura por Compresión*. (UNE 83507).
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Hormigones con Fibras, Determinación del Índice de Tenacidad a Compresión*. (UNE 83508).
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Hormigones con Fibras, Rotura por Flexotracción*. (UNE 83509).
- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2004). *Hormigones con Fibras, Determinación del Índice de Tenacidad y Resistencia a la primera fisura*. (UNE 83510).

- Asociación Española de Normalización y Certificación, Comité Técnico AEN/CTN 83 (2005). *Hormigones con Fibras, Determinación de la Resistencia a Cortante*. (UNE 83511).
- Carvajal, M., González, E. (2012). *Comparación de los Módulos de Elasticidad de Concreto Normal, con el ensayo de compresión y el ensayo de Flexión*. Tesis para optar al Título de Ingenieros Civiles, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Bucaramanga.
- Camposano, J. (2009). *Control de Calidad en el Hormigón, Control por Resistencia*. Quito, Ecuador: INECYC.
- Conrado, M., Rojas, S. (2012), *Diseño de Hormigones con Fibra de Polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 MPa con agregados de la cantera de Guayllabamba*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central de Ecuador, Quito, Ecuador.
- Estado unidos de América, American concrete Institute (1997). *Estado del Arte del Reporte en Hormigón de Alta Resistencia*. ACI Comité 363.
- Estados Unidos de America, (2008). *Requisitos para Concreto Estructural*. ACI Comité 318S.
- Giaccio, G., Martín, A., Zerbino, R. (2001, Septiembre). Tenacidad en Compresión de Hormigones Reforzados con Fibras de Acero. Ponencia presentada en las Jornadas SAM-CONAMET-AAS 2001, La Plata, Argentina.
- González, Oc. (2010). *Generalidades sobre las fibras Artificiales*. Palmira, Colombia: Universidad de Colombia.
- Herrería, S., Villegas, F. (2008). *Módulos de Elasticidad y Curvas de Esfuerzo Deformación, en base a la Compresión del Hormigón a 21, 28, 35 MPa*. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.
- Imbaquingo, A. (2012). *Diseño de Hormigón de Alto Desempeño*. Tesis para optar por el Título de Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.

- Khaledmarar, Özgüreren, Tahirçelik (2000, Noviembre 3). Relación entre la Tenacidad a la Flexión y la Energía de Impacto en Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras (HSFRC). *Materiales de Construcción*, pp. 5, 6.
- Laboratorio de Mecánica Gral. M. N. Savio (Sin año). *Ensayo de Tracción Estática. Determinación del Módulo de Elasticidad*. Rodríguez, O.
- Luna, G., (2014). Estudio del Hormigón. Quito, Ecuador
- Macías, J., Artola, M., Hernández, P. (Sin Año). *Utilización de Fibras en Hormigones. La experiencia Cubana con el empleo del Fibrequen*.
- Mass, G., et. al. (1998). Guía para seleccionar las proporciones para concreto de alta resistencia con cemento portland y ceniza volante (Reporte del Comité ACI 211). Distrito Federal, México: Traducido por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
- Sadegzadeh, M., Kettle, R., Vassou, V. (2004, Enero). Fibras de Vidrio, Acero y Polipropileno: Hormigón con Fibras es más Resistente. *Concrete*, pp. 50-52
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2009). *Determinación del Tiempo de Fraguado. Método de Vicat*. (NTE INEN 158:2009).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2009). *Determinación de la Consistencia Normal. Método Vicat*. (NTE INEN 157:2009).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (20XX). Áridos para Hormigón. Requisitos. (NTE INEN 872:20XX).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Grueso*. (NTE INEN 857:2010).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Fino*. (NTE INEN 856:2010).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos*. (NTE INEN 858:2010).

- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Determinación de las Impurezas Inorgánicas en el Árido Fino para Hormigón*. (NTE INEN 855:2010).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Áridos. Reducción de Muestras a Tamaño de Ensayo*. (NTE INEN 2566:2010).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2010). *Cemento hidráulico. Definición de Términos*. (NTE INEN 151:2010).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2011). *Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos*. (NTE INEN 2380:2011).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2011). *Determinación de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles*. (NTE INEN 860:2011).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2011). *Análisis Granulométrico en los Áridos Fino y Grueso*. (NTE INEN 696:2011).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2012). *Hormigón de Cemento Hidráulico. Refrentado de Especímenes Cilíndricos para la Determinación de la Resistencia a la Compresión*. (NTE INEN 2649:2012).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2012). *Cemento Portland, Requisitos*. (NTE INEN 152:2012).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (2012). *Hormigón de Cemento Hidráulico / Agua para Mezcla, Requisitos*. (NTE INEN 2617:2012).
- Osorio, J. D. (2011). ¿Qué es el Módulo de Elasticidad en el Concreto? Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/que-es-el-modulo-de-elasticidad-en-el-concreto/>