



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de grado previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

TÍTULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

“DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ÓPTIMA DE POLÍMERO ELÁSTICO PARA UN HORMIGÓN MODIFICADO DE 28 MPa Y SU INFLUENCIA EN ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES”

AUTORES:

Luis Orlando Pilamunga Rea

Raúl Guamán Chacaguasay

DIRECTOR:

Ing. Daniel Ríos

AÑO:

2016

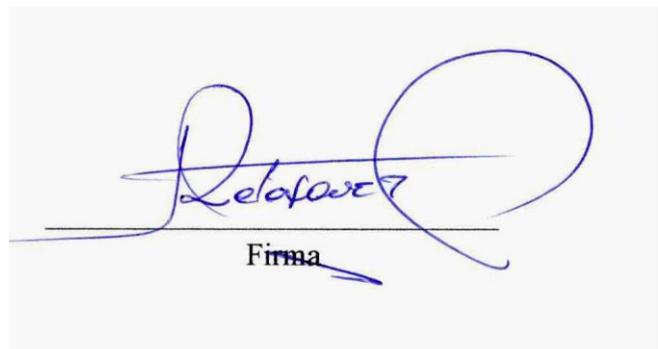
Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título:
“Determinación de la Cantidad Óptima de Polímero Elástico para un Hormigón Modificado de 28 MPa y su Influencia en Algunas de sus Propiedades”.

Presentado por: Luis Orlando Pilamunga Rea y Raúl Guamán Chacaguasay; y dirigida por: Ing. Daniel Ríos.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Víctor Velázquez.
Presidente del Tribunal



Ing. Daniel Ríos.
Miembro del Tribunal



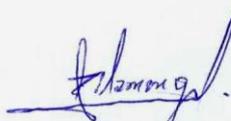
Ing. Alexis Martínez.
Miembro del Tribunal



AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN

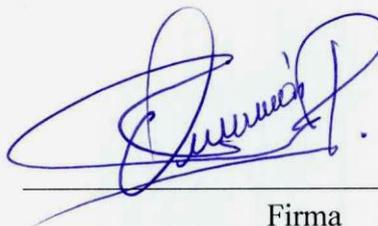
“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente a: Luis Orlando Pilamunga Rea, Raúl Guamán Chacaguasay y al Director del Proyecto Ing. Daniel Ríos; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.”

Luis Orlando Pilamunga Rea.
C.I.: 060387720-0



Firma

Raúl Guamán Chacaguasay.
C.I.: 060418261-8



Firma

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente nos gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirnos para llegar hasta donde hemos llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO por darnos la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A nuestro director de tesis, Ing. Daniel Ríos por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en nosotros que podamos terminar nuestros estudios con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, y en especial a los señores: Ingeniero Alexis Martínez, Miembro del Tribunal por su valiosa asesoría y colaboración, al Ingeniero Víctor Velásquez, Presidente del Tribunal por su interés y apoyo brindado.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

DEDICATORIA

Una vez cumplida una parte de mí vida y haber culminado mis estudios en la Carrera de Ingeniería Civil dedico esta tesis de grado a:

Primeramente, a mi Dios, quien me dio la sabiduría, la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza para terminar este trabajo.

A mis padres Manuel Pilamunga y Maria Rea por guiarme de la manera más correcta en la vida, dándome su apoyo incondicional confiando en todas las decisiones que eh tomado en mi vida.

A mis hermanas Belén y Fanny que me supieron aconsejar en cada paso que he dado en mi vida.

A mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo en la universidad siendo parte de esta etapa en la que compartimos buenas experiencias y ganamos buenas amistades.

¡Gracias! Sin ustedes no hubiese podido hacer realidad este sueño.

Luis Orlando Pilamunga Rea.

DEDICATORIA

El éxito alcanzado es dedicado, al exclusivo Dios de las naciones, por la tutela personal que transmitía a lo largo de la travesía universitaria, ciclo en la cual las probabilidades a la omisión de su voluntad, eran eminentes acorde a las fuerzas personales. Además, quiere dirigir este logro a mis Papis Gerardo y Rosita por la mejor predisposición que dispensaron a lo largo del trayecto de la vida, sus extraordinarios consejos obtenidos por medio de grandes sacrificios son loables y admirables que agudizan la atención al grabarlos y guardarlos en el corazón. El mejor regalo es compartir la existencia conjunta con ustedes seres amados, admirables por siempre.

Raúl Guamán Chacaguasay.

INDICE GENERAL

RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
CAPÍTULO I	4
1. FUNDAMENTACION TEÓRICA	4
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVO	4
1.2. FUNDAMENTACION FILOSOFICA.....	5
1.3. FUNDAMENTACIÓN LEGAL	5
1.3.1. Políticas nacionales de residuos sólidos.....	6
1.3.2. Plan nacional de neumáticos fuera de uso.	6
1.3.3. El hormigón y sus componentes.	6
1.3.4. Dosificación de las mezclas de hormigón.....	7
1.3.5. Toma de muestras de hormigón.	8
1.3.6. Fibras dispersas.	8
1.4. ENFOQUE TEÓRICO	8
1.4.1. Hormigón.....	8
1.4.2. Componentes del hormigón.....	11
1.4.3. Caucho.....	15
CAPÍTULO II	25
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1. TIPO DE ESTUDIO.....	25
2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	26
2.2.1. Población.....	26
2.2.2. Muestra.	27
2.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	31
2.4. PROCEDIMIENTOS.....	34
2.4.1. Ensayos de los materiales empleados en el hormigón modificado.	35
2.4.2. Método de Diseño.....	39
2.4.3. Ensayos antes del fraguado.....	44
2.4.4. Ensayos después del fraguado.	47
2.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	64
CAPÍTULO III	65
3. RESULTADOS	65

3.1.	ENSAYOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....	65
3.1.1.	Propiedades de los áridos (Fino y Grueso).....	65
3.1.2.	Propiedades del polímero elástico reciclado.....	67
3.1.3.	Propiedades del cemento.....	68
3.2.	MÉTODO DE DISEÑO.....	69
3.3.	ENSAYOS ANTES DEL FRAGUADO.....	72
3.4.	ENSAYOS DESPUES DEL FRAGUADO.....	73
3.4.1.	Ensayo a Compresión.....	75
3.4.2.	Módulo de elasticidad estático del concreto por compresión de cilindros.....	82
3.4.3.	Resistencia a la tracción por compresión diametral.....	84
3.4.4.	Resistencia a la flexión (Vigas).....	89
3.4.5.	Densidad, Absorción y Porosidad.....	92
3.4.6.	Adherencia entre hormigón – acero sometidos a cargas.....	94
CAPÍTULO IV.....		96
4.	DISCUSIÓN.....	96
4.1.	ENSAYOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....	96
4.1.1.	Propiedades de los áridos (Fino y Grueso).....	96
4.1.2.	Propiedades del polímero elástico reciclado.....	98
4.2.	MÉTODO DE DISEÑO.....	99
4.3.	ENSAYOS ANTES DEL FRAGUADO.....	101
4.3.1.	Asentamiento.....	101
4.3.2.	Densidad, Rendimiento y Contenido de aire en el hormigón fresco.....	102
4.4.	ENSAYOS DESPUES DEL FRAGUADO.....	104
4.4.1.	Compresión de cilindros.....	104
4.4.2.	Módulo de elasticidad estático del concreto por compresión de cilindros.....	109
4.4.3.	Resistencia a la tracción por compresión diametral.....	110
4.4.4.	Resistencia a la flexión (Vigas).....	113
4.4.5.	Densidad, Absorción y Porosidad.....	116
4.4.6.	Adherencia entre hormigón – acero sometidos a cargas.....	120
4.4.7.	Consideraciones económicas.....	124
CAPÍTULO V.....		126
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
5.1.	CONCLUSIONES.....	126
5.2.	RECOMENDACIONES.....	128
CAPÍTULO VI.....		129

6.	PROPUESTA	129
6.1.	TÍTULO DE LA PROPUESTA	129
6.2.	INTRODUCCIÓN	129
6.3.	OBJETIVOS	131
6.3.1.	Objetivo General.	131
6.3.2.	Objetivos Específicos.....	131
6.4.	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO –TÉCNICA	131
6.4.1.	Definición de los pavimentos.	131
6.4.2.	Requisitos para el comportamiento.....	133
6.4.3.	Factores de Diseño.	133
6.4.4.	Pavimento rígido o hidráulico.	136
6.4.5.	Funciones de las distintas capas de un pavimento rígido.....	139
6.4.6.	Diseño del pavimento rígido.	140
6.4.7.	Variables de diseño de un pavimento rígido.....	142
6.4.8.	Juntas de hormigonado.....	155
6.4.9.	Fallas del pavimento rígido.	158
6.5.	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	158
6.5.1.	El hormigón convencional y modificado para aplicar en el diseño del pavimento rígido. 158	
6.5.2.	Diseñar el pavimento rígido por el método AASHTO.....	161
6.5.3.	Análisis comparativos de costos.	161
6.6.	DISEÑO ORGANIZACIONAL.....	162
6.7.	MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA	163
6.7.1.	Diseño de pavimento rígido (hormigón convencional) de la Vía Calpi – San Juan, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo de la abscisa 0+000 km a 14+500 km.	163
6.7.2.	Diseño de pavimento rígido (hormigón modificado) de la Vía Calpi – San Juan, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo de la abscisa 0+000 km a 14+500 km.	171
6.7.3.	Cantidades de obra Pavimento rígido con hormigón convencional.	173
6.7.4.	Cantidades de obra Pavimento rígido con hormigón modificado.	176
6.7.5.	Análisis comparativo de costos.....	180
	CAPÍTULO VII	184
7.	BIBLIOGRAFÍA	184
	CAPÍTULO VIII	186
8.	ANEXOS	186

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tamaño de Tamices ASTM C-33.....	12
Tabla 2 .- Materiales constituyentes del neumático.	19
Tabla 3.- Neumáticos de Pasajeros (automóviles y camionetas)	19
Tabla 4. - Neumáticos MCT (camiones y microbuses)	19
Tabla 5 .- Propiedades Caucho Natural vs Elastómeros Sintéticos.....	20
Tabla 6.- Los ensayos que se realizaron antes y después del fraguado del hormigón	26
Tabla 7.- Factor de modificación para la desviación estándar.....	28
Tabla 8.- Ensayos para determinar las propiedades del hormigón convencional.....	29
Tabla 9.- Ensayos para encontrar el valor óptimo de adición.	30
Tabla 10.- Ensayos con el porcentaje óptimo de polímero elástica.	31
Tabla 11.- Resistencia a la compresión del hormigón en función a la relación agua/cemento.	42
Tabla 12.- Dosificación final empleando el método de la densidad óptima.	71
Tabla 13.- Datos de medición del asentamiento con la dosificación inicial de las mezclas.	72
Tabla 14.- Datos de la densidad, rendimiento y contenido de aire con la dosificación inicial.	73
Tabla 15.- Nomenclatura de los especímenes.	73
Tabla 16.- Ensayos para determinar las Propiedades del Hormigón Patrón y Modificado	74
Tabla 17.- Total Probetas hormigón Convencional.....	77
Tabla 18.- Total probetas hormigón Modificado	77
Tabla 19.- Resumen de resistencias Alcanzadas hormigón Convencional y Modificado (Adición) ..	78
Tabla 20.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión	79
Tabla 21.- Resumen de resistencias Alcanzadas hormigón Convencional y Modificado (Adición y sustitución).....	80
Tabla 22.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión	81
Tabla 23.- Primera etapa Módulo de elasticidad estático.	82
Tabla 24.- Segunda etapa módulo de elasticidad con el porcentaje óptimo.	83
Tabla 25.- Total Probetas hormigón Convencional.....	85
Tabla 26.- Total probetas hormigón Modificado	86
Tabla 27.- Resistencia C. Diametral hormigón Convencional y Modificado.	86
Tabla 28.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión Diametral.	87
Tabla 29.- Resistencia C. Diametral hormigón Convencional y Modificado	88
Tabla 30.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión Diametral.	88
Tabla 31.- Total Probetas hormigón Convencional, Ensayo a Flexión.	90
Tabla 32.- Total probetas hormigón Modificado Ensayo a Flexión	90
Tabla 33.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado.....	91

Tabla 34.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado.....	92
Tabla 35.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado Restitución	92
Tabla 36.- Absorción, densidad y porosidad hormigón convencional.....	93
Tabla 37.- Absorción, densidad y porosidad hormigón convencional.....	93
Tabla 38.- Primera etapa esfuerzo de adherencia.....	94
Tabla 39.- Segunda etapa determinar el esfuerzo de adherencia.....	95
Tabla 40.- Características físicas de los agregados.	97
Tabla 41.- Carga máxima y deslizamiento producido en las diferentes mezclas.....	122
Tabla 42.- Carga máxima y deslizamiento producido en las diferentes mezclas.....	123
Tabla 43.- Costo total de materiales utilizados en la investigación.....	124
Tabla 44.- Costo m3 hormigón convencional.	124
Tabla 45.- Costo m3 hormigón modificado.	125
Tabla 46.- Variación del CBR.	135
Tabla 47.- Factor de distribución por carril.....	144
Tabla 48.- Periodos de diseño en función del tipo de carretera (n).	145
Tabla 49.- Valores del coeficiente de transferencia de carga J.....	147
Tabla 50.- Recomendaciones para la selección de la barra pasajuntas.....	149
Tabla 51.- Recomendaciones de espaciamiento máximo.....	150
Tabla 52.- Incremento en el valor K del suelo, según el espesor de una base granular.....	152
Tabla 53.- Calidad de drenaje.	154
Tabla 54.- Valores del coeficiente de drenaje Cd.	154
Tabla 55.- Niveles de confiabilidad (R) para diferentes carreteras.	154
Tabla 56.- Valores de ZR en función de la confiabilidad.	155
Tabla 57.- Valores de ZR en función de la confiabilidad.	164
Tabla 58.- Variabilidad o Error Estándar Combinado So.....	164
Tabla 59.- Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño.	165
Tabla 60.- Factor de crecimiento del tráfico.....	166
Tabla 61.- Factor de distribución por carril.....	167
Tabla 62.- Valores del coeficiente de drenaje Cd.	168

INDICE DE GRÁFICOS E ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Diagrama del proceso de fabricación de neumáticos. (Neumático, 2015)	17
Ilustración 2.- Construcción de vivienda por medio de hormigón reciclado.....	18
Ilustración 3.- Tamaño de grano triturado en el mercado.	21
Ilustración 4.- Tipos de polímero elástico suministrados por la empresa FACERQUIM.....	22
Ilustración 5.- Caucho granulado.....	23
Ilustración 6.- Ecuación polinómica de tercer orden para encontrar el valor de k.	28
Ilustración 7.- Esquema del procedimiento seguido en la investigación.	34
Ilustración 8.- Proceso para determinar la densidad SSS de los áridos.....	35
Ilustración 9.- Proceso para determinar el porcentaje del contenido de humedad de los áridos...	37
Ilustración 10.- Proceso para determinar el porcentaje del contenido de humedad del polímero elástico.	38
Ilustración 11.- Elaboración del hormigón y marcado de los especímenes para su identificación..	39
Ilustración 12.- Verificando la consistencia del hormigón mediante el cono de Abrams.	44
Ilustración 13.- Colocación del hormigón en el recipiente de medición y pesaje del mismo.	45
Ilustración 14.- Colocación del espécimen en el Compresómetro para luego colocar en la maquina universal.	47
Ilustración 15.- Posición del espécimen en la máquina de ensayo para determinar la resistencia a tracción por compresión diametral. Fuente: (Concreto, 2009)	49
Ilustración 16.- Colocación del espécimen en el molde, para alineación de cilindros de hormigón y tiras de carga.....	51
Ilustración 17.- Diferencia de fractura entre el hormigón convencional y el modificado.....	51
Ilustración 18.- Esquema del aparato apropiado para ensayos de flexión en el hormigón, por el método de la carga en los tercios de la luz libre. Fuente: (Concreto, 2009)	52
Ilustración 19.- Señalar las vigas de acuerdo a la norma INEN antes del ensayo.....	53
Ilustración 20.- Determinando la masa inicial del espécimen para posteriormente determinar la masa saturada después de ebullición en agua.	55
Ilustración 21.- Determinando las dimensiones del espécimen utilizando un tornillo micrométrico.	56
Ilustración 22.- Retirando los especímenes del horno.	56
Ilustración 23.- Removiendo con franela la humedad superficial de los especímenes.....	57
Ilustración 24.- Limpiando los moldes para proceder a fundir las probetas cúbicas.	59
Ilustración 25.- Curado inicial de las probetas cúbicas de hormigón.	60
Ilustración 26.- Los especímenes ubicados en el tanque de curado.	61
Ilustración 27.- Esquema del ensayo para determinar la adherencia hormigón - acero.	61
Ilustración 28.- Placa base colocado en el pistón.....	62
Ilustración 29.- Forma de colocación del deformímetro.....	63

Ilustración 30.- Medición de la longitud desplazada con el calibrador pie de rey digital.	63
Ilustración 31.- Arena triturada después del tamizado.	65
Ilustración 32.- Ripio triturado después del tamizado.	66
Ilustración 33.- Polímero elástico # 6 suministrado por FACERQUIM.	67
Ilustración 34.- Cemento Chimborazo tipo IP.	68
Ilustración 35.- Moldes Cilíndricos para probetas de Hormigón de 10 x 20 cm.	75
Ilustración 36.- Ensayo de Compresión de un cilindro de Hormigón	76
Ilustración 37.- Esquema de los moldes típicos de fractura.	76
Ilustración 38.- Curva Esfuerzo vs Tiempo del hormigón Patrón y Modificado	78
Ilustración 39.- Curva Esfuerzo vs Tiempo.	80
Ilustración 40.- Ensayo de Tracción Indirecta.	84
Ilustración 41.- Moldes Cilíndricos para probetas de Hormigón de 15 x 30 cm.	85
Ilustración 42.- Polímero elástico reciclado.	98
Ilustración 43.- Componentes del Hormigón por método de densidad óptima. Primera etapa ...	100
Ilustración 44.- Componentes del hormigón por método de densidad óptima. Segunda etapa ...	100
Ilustración 45.- Resultados del ensayo de asentamiento con diferentes porcentajes.	101
Ilustración 46.- Densidad de las diferentes mezclas del hormigón.	102
Ilustración 47.- Rendimiento de las diferentes mezclas del hormigón.	103
Ilustración 48.- Contenido de aire de las diferentes mezclas del hormigón.	103
Ilustración 49.- Comparación de Resultados 1 Etapa.	104
Ilustración 50.- Comparación de Resultados 2 Etapa.	105
Ilustración 51.- Falla tipo 2 Hormigón Convencional.	106
Ilustración 52.- Falla tipo 2 Hormigón Modificado.	107
Ilustración 53.- Comparación de Curva esfuerzo-deformación de las mezclas. Primera etapa.	109
Ilustración 54.- Comparación de curva esfuerzo-deformación de las mezclas. Segunda etapa. ...	110
Ilustración 55.- Promedio de resultados C. Diametral 1 Etapa.	111
Ilustración 56.- Promedio de resultados C. Diametral 2 Etapa.	112
Ilustración 57.- Promedio de resultados C. Diametral 1 y 2 Etapa.	112
Ilustración 58.- Resumen de Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 1 etapa.	114
Ilustración 59.- Comprobación de resultados (Segunda etapa).	114
Ilustración 60.- Resultados de sustitución Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 2 etapa.	115
Ilustración 61.- Comprobación de resultados Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 2 etapa.	116
Ilustración 62.- Resumen de Densidades Hormigón convencional y modificado 1 etapa.	117
Ilustración 63.- Resumen de Absorción Hormigón convencional y modificado 1 etapa.	118
Ilustración 64.- Resumen de Porosidad Hormigón convencional y modificado 1 etapa.	118
Ilustración 65.- Resumen de Densidades del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).	119
Ilustración 66.- Resumen de Absorción del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).	119
Ilustración 67.- Resumen de Porosidad del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).	120
Ilustración 68.- Esfuerzo de adherencia en relación a la variación. Primera etapa.	120

Ilustración 69.- Relación entre la carga aplicada vs. El deslizamiento producido. Primera etapa .	121
Ilustración 70.- Esfuerzo de adherencia en relación a la variación. Segunda etapa	122
Ilustración 71.- Relación entre la carga aplicada vs. El deslizamiento producido. Segunda etapa	123
Ilustración 72.- Estructura del pavimento.	131
Ilustración 73.- Secciones donde se pueden apreciar las capas del firme rígido.	136
Ilustración 74.- Componentes principales del sistema.....	137
Ilustración 75.- Pavimento rígido en planta.	137
Ilustración 76.- Pavimento de concreto hidráulico simple. Con elementos de transferencia de carga o pasadores.	139
Ilustración 77.- Diagrama de distribución de carga en un pavimento rígido y flexible.	140
Ilustración 78.- Colocación de pasadores. En sentido transversal.	148
Ilustración 79.- Colocación Barras de unión. Sentido longitudinal.....	149
Ilustración 80.- Relación entre el valor relativo de soporte (C.B.R.) y el módulo de reacción de la subrasante (k).....	153
Ilustración 81.- Sellado de juntas.....	155
Ilustración 82.- Tipos de juntas de contracción.....	156
Ilustración 83.- Tipos de juntas de construcción.	157
Ilustración 84.- Tipos de juntas de expansión.	157
Ilustración 85.- Comparación de costos del pavimento rígido con hormigón convencional y modificado.	183

RESUMEN

Por mucho tiempo, los neumáticos usados han constituido un problema ambiental. Es por ello que con la finalidad de minimizar el impacto ambiental que generan las mismas, luego de transcurrida su vida útil, surge como objetivo fundamental del presente trabajo, determinar la cantidad óptima de polímero elástico para un hormigón modificado de 28 MPa y su influencia en algunas de sus propiedades. Comparando dichos resultados con los obtenidos en una mezcla de hormigón convencional, para buscar efectivos métodos de reciclaje de neumáticos y junto con ello nuevas aplicaciones para el producto derivado de dicha actividad.

Para el desarrollo del trabajo se prepararon mezclas en dos etapas. La primera etapa consiste en la adición de polímero elástico en diferentes porcentajes 2, 5, 7, 10% con referencia al agregado fino. En cambio la segunda etapa consiste en reemplazar parte del agregado grueso por el porcentaje óptimo de polímero (2%). Observando ventajas en la primera etapa del estudio. Se evaluaron diferentes propiedades como: resistencia a la compresión, a la flexión, a la tracción por compresión diametral, módulo de elasticidad, densidad, absorción, porosidad y adherencia entre acero – hormigón.

De acuerdo a los ensayos mecánicos a la edad de 28 días, el hormigón convencional producía un ruido estruendoso, lo que no sucedía con la adición de polímero, esto se debe a una alta capacidad de absorber energía plástica. Y posterior al agrietamiento las partes se mantenían juntas permitiendo que el material soporte grandes deformaciones.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE IDIOMAS

Dr. Danilo Yopez

8 de Mayo de 2016

SUMMARY

A long time, used tires have become an environmental problem. That is why in order to minimize the environmental impact generated by them after elapsed life, emerges as a fundamental objective of this work, determine the optimal amount of elastic polymer to a modified concrete of 28 MPa and its influence on some of its properties. Comparing these results with those obtained in a mixture of conventional concrete, to find effective methods of recycling tires and with it new applications for the product derived there from.

To develop the work mixtures were prepared in two stages. The first step is the addition of elastic polymer in different percentages 2, 5, 7, 10% with reference to the fine aggregate. Instead, the second step consists of replacing part of coarse aggregate by the optimal percentage of polymer (2%). Noting advantages in the first stage of the study. - Concrete compressive strength, flexural, diametral tensile strength by compression modulus of elasticity, density, absorption, porosity and adhesion between steel and different properties were evaluated.

According to the mechanical tests at the age of 28 days, the conventional concrete produced a loud noise, which was not the case with the addition of polymer, this is due to a high capacity to absorb plastic energy. And after the cracking parts were held together allowing the material to support large deformations.

CENTRO DE IDIOMAS



INTRODUCCION

La investigación de nuevos métodos para la obtención de un hormigón con mejor resistencia mecánica y durabilidad, han sido el objetivo principal de investigadores en la industria de la construcción, por ello cada día se incorporan nuevos materiales que aumentan su durabilidad, resistencia, tal es el caso de material reciclado de caucho, fibras reforzadas de polímeros, entre otros que dan lugar a estudios denominados “Hormigón Modificado”.

Uno de los problemas ambientales difíciles de solucionar, ha sido desaparecer los materiales no degradables que afectan directamente al equilibrio ecológico, tanto en lo que respecta a la difícil tarea de desaparecerlos como en la demanda cada vez mayor de materias primas. De forma particular para este estudio se hace mención a los cientos de neumáticos fuera de uso, que se acumulan año tras año y que crecen considerablemente con relación a la demanda de vehículos que se venden tanto en el país como en el cantón Riobamba.

Debido a esta problemática ambiental y considerando que una de las oportunidades más prometedoras en la industria de la construcción radica en la innovación de materiales y procesos de construcción, se ha tomado la iniciativa de fabricar hormigón, utilizando fibras de caucho de neumáticos reciclados, con la finalidad de mitigar el impacto ambiental, que estos producen provocado impactos negativos en la naturaleza y el ambiente.

En nuestro país, aun no es muy difundido la incorporación de materiales reutilizables como el reciclado de polímero elástico (Caucho), en combinación del hormigón convencional, tal vez por la falta de investigación de las características físicas, mecánicas y desconocer del real comportamiento de un material de esta índole.

El propósito que se persigue al realizar este proyecto de investigación, es determinar las propiedades de un Hormigón Modificado, a base de materiales yacente en la provincia.

Con la finalidad de determinar la factibilidad del presente estudio, el primer capítulo se inició con el planteamiento del problema, presentada precedente a la apropiación de la investigación, haciéndose necesario encontrar alternativas de control y reciclaje de los neumáticos usados, se dan a conocer los objetivos y se identifican las variables.

En el capítulo uno, se muestran datos bibliográficos y conceptuales como fundamentación teórica, que asegura los antecedentes de la investigación.

En el capítulo dos, se presenta la metodología de la investigación en cada etapa, como son de campo y de laboratorio, identificando las variables, tipo de muestra e identificación de la hipótesis.

En el capítulo tres, se procesaron los datos obtenidos durante la observación, experimentación y análisis, para su posterior interpretación en referencia a otras investigaciones parecidas y así demostrar o comprobar la hipótesis planteada.

En el capítulo cuatro, se presentan las discusiones con referencia a los resultados, deben ofrecer suficiente evidencia científica como para respaldar a las conclusiones. Debe existir además una fuerte correlación entre la introducción y las conclusiones.

En el capítulo cinco, se establecen las conclusiones y recomendaciones, considerando los parámetros de resistencia, peso y costo del Hormigón, lo que define la factibilidad de la investigación.

En el capítulo seis, se muestra la propuesta, incorporando fibras de caucho de neumáticos fuera de uso, como una alternativa viable de mitigación del impacto ambiental en el cantón Riobamba.

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTACION TEÓRICA

1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVO

El desarrollo de materiales alternativos empleados en la industria de la construcción es un acontecimiento que se ha incrementado en los últimos años. En donde el aprovechamiento de diferentes residuos generados en las ciudades, es el eje central de la mayoría de las investigaciones. Esta situación obedece principalmente a dos causas, una como estrategia para la disminución de los altos volúmenes de residuos generados y otra a las formas de obtención de materiales para los hormigones de la forma tradicional (explotación indiscriminada de agregados) que a la larga traerán problemas consigo en la explotación a cielo abierto, en daños medioambientales, de salud para los que se dedican a estas labores.

Analizar la reutilización de polímero elástico (neumáticos) dentro del campo de la construcción, es una alternativa que ayudaría para la reducción del impacto ambiental que el depósito de neumáticos usados provoca.

Una de las investigaciones proporcionado por el Centro Catalán del Reciclaje, en la realización del proyecto “Incorporación de granza de caucho procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso en el hormigón”, concluye que el trabajo ha sido un primer paso necesario para explorar la viabilidad técnica, asegurando al mismo tiempo, que no se produce una pérdida sensible de la resistencia mecánica.

En el trabajo del Arq. Pedro Avilés, “Hormigones y Caucho; posibilidades generales para el reciclaje de neumáticos usados”; comenta que, las características favorables del caucho como densidad más baja, valores considerados en dureza, resistencia de impacto, ductilidad y el aislamiento de calor comparado al hormigón convencional, sería un elemento ventajoso para usos en la construcción, además manifiesta que los materiales compuestos de Hormigón y residuos de caucho trabajan de buena forma. Del “Estudio de hormigón elaborado con caucho reciclado de diferentes tamaños de partículas”, se puede inferir que es factible, utilizando el 5% en peso de caucho de tamaño aleatorio, ya que no deteriora las características del hormigón, además lo vuelve más liviano y al mismo tiempo ayuda a disminuir los efectos negativos que generan los desechos de caucho en el medio ambiente. (Venezuela, 2008)

Simplemente en el país se generan en promedio mensual más de 55 000 toneladas de llantas como desecho urbano, que aunque no es considerado como residuo peligroso, es un problema grave en términos de disposición final, pues los grandes volúmenes encontrados en los rellenos sanitarios reflejan la importancia que tiene estos materiales. Así mismo en el proceso de revitalizado de llantas existe también la generación considerable de reencauche de llantas en la ciudad de Riobamba para la respectiva reutilización pero; esta solución toma en cuenta solo llantas de hasta un cierto grado de uso, lo cual indica que las llantas en un alto grado de deterioro en el mejor de los casos es incinerado a muy altas temperaturas, no deja de ser un problema económico- ambiental para los generadores del mismo. (INVEC, 2015)

En este sentido, se tiene el antecedente en la elaboración de hormigón modificado a base de fibras de caucho en los países industrializados; en nuestro país existe la fuente en la elaboración de “Bloques con adición de caucho”, en la Universidad Técnica de Ambato. A base de las investigaciones precedentes se optara tomar en cuenta ciertos principios en procura de lograr los objetivos planteados, en el desarrollo de un hormigón modificado con materiales obtenidos en nuestro medio.

1.2. FUNDAMENTACION FILOSOFICA

Es indispensable conocer las propiedades técnicas de las fibras de caucho que se emplean como refuerzo para la elaboración de hormigón de distintas resistencias en la industria de la construcción, debido a que influyen directamente en las propiedades mecánicas del mismo, resultando imprescindible conocer la cantidad de fibra que se adicionará permitiendo obtener hormigones de buena calidad y resistencia estable.

Esta investigación se desarrolla con la finalidad de distinguir el comportamiento del hormigón al adicionar fibras de caucho con agregados de la zona que son utilizados en las distintas construcciones civiles de la ciudad de Riobamba, y todo sustentado en base a ensayos técnicos de laboratorio con el fin de obtener resultados confiables.

1.3. FUNDAMENTACIÓN LEGAL

La presente investigación toma como precedente las Disposiciones establecidas por el estado ecuatoriano en sus diferentes dependencias tales como: La Constitución, Normas Ambientales

y la Norma Técnica Ecuatoriana en la cual establece que los materiales de construcción, serán evaluados y verificados para que cumplan con los requisitos, conforme con el Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE INEN) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN), que se encuentren vigentes; de no existir éstos se remitirán a los requisitos dados en las normas ASTM.

1.3.1. Políticas nacionales de residuos sólidos.

Art. 30.- El Estado Ecuatoriano declara como prioridad nacional la gestión integral de los residuos sólidos en el país, como una responsabilidad compartida por toda la sociedad, que contribuya al desarrollo sustentable a través de un conjunto de políticas intersectoriales nacionales.

Art. 35.- ÁMBITO TÉCNICO. Fomentar a la investigación y uso de tecnologías en el sector, que minimicen los impactos al ambiente y la salud, mediante el principio precautorio.

1.3.2. Plan nacional de neumáticos fuera de uso.

Esta normativa nos estipula que se debe reciclar el 25% en peso de los neumáticos y recauchar un 20%.

1.3.3. El hormigón y sus componentes.

El cemento hidráulico se puede comercializar envasado en fundas de papel, fundas de plástico, bolsas grandes, al granel o en la forma que acuerden comprador y vendedor en el contrato de pedido. El cemento en fundas debe cumplir con la norma NTE INEN 1902. Las normas que contienen los procedimientos de ensayos a utilizar son:

- **NTE INEN 156 (ASTM C 188):** Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.
- **NTE INEN 158 (ASTM C 191):** Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.

“Los Áridos son materiales granulares que constituye el mayor volumen en la mezcla para la preparación de un hormigón. Sus propiedades físicas y mecánicas juegan un papel muy

importante en las del hormigón. Puede provenir de la trituración de mantos de roca natural o de cantos rodados, o de materiales artificialmente fabricados.”

Los ensayos que se realizan son:

- **NTE INEN 696 (ASTM C136):** Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- **NTE INEN 856 (ASTM C128):** Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
- **NTE INEN 857 (ASTM C127):** Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
- **NTE INEN 858 (ASTM C 29):** Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.
- **NTE INEN 860 (ASTM C131):** Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles.
- **NTE INEN 859 (ASTM C70):** Determinación de la humedad superficial en el árido fino.

El agua desempeña uno de los papeles vitales en el hormigón. Es el componente que se combina químicamente con el cemento para producir la pasta que aglutina las partículas del árido, las mantiene unidas y colabora en gran medida con la resistencia y todas las propiedades mecánicas del hormigón. El agua empleada en el mezclado de hormigón, debe cumplir con las disposiciones de la norma ASTM C 1602.

1.3.4. Dosificación de las mezclas de hormigón.

Las mezclas de hormigón se deben dosificar para cumplir con la relación máxima de agua-cemento (a/c) y otros requisitos según la clase de exposición asignada al elemento estructural. El hormigón estructural, la resistencia a la compresión no será menor a $f'c = 21$ MPa. La dosificación se puede basar también en la experiencia de obras similares, en mezclas de prueba o en ambas.

La evaluación y aceptación del hormigón será según lo indicado en las normas:

- **NTE INEN 1 855-1 (ASTM C 94)**
- **NTE INEN 1 855-2.**

1.3.5. Toma de muestras de hormigón.

La toma de muestras de hormigón debe ser obtenida de acuerdo a la norma NTE INEN 1-763, además el número de cilindros deben ser los indicados en las especificaciones de la obra o en la NTE INEN 1855-1.

1.3.6. Fibras dispersas.

“El término “fibras estructurales” requiere de ciertas normas y ensayos que debido a su adición al concreto aporta o contribuye de manera efectiva a la capacidad de carga a flexión, de corte y de impacto en un elemento de concreto, además de mejorar el control de fisuras por retracción y la durabilidad del concreto”. (C1017, 2013)

Las fibras a ser utilizadas como refuerzo estructural de hormigón deben cumplir con las siguientes normas:

- **ASTM C1017 / C1017M:** Especificación para aditivos químicos utilizados en la elaboración de hormigón fluido.
- **ASTM C1116:** Especificación para hormigón reforzado con fibras.
- **ASTM A 820.** Adiciones y fibras dispersas a ser utilizadas como refuerzo de hormigón.

1.4. ENFOQUE TEÓRICO

1.4.1. Hormigón.

Es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos.

El aglomerante es en la mayoría de las ocasiones cemento (generalmente cemento Portland) mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos (que se clasifican en grava, gravilla y arena). (Montero, 1986)

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas armaduras de acero, recibiendo en este caso la denominación de hormigón armado.

1.4.1.1. Diseño de una mezcla de hormigón.

El diseño de una mezcla es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- Selección de los constituyentes del hormigón.
- Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, un hormigón de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido.
- Ajuste de las cantidades estimadas mediante su ensayo en pastones de prueba.

Aunque muchas de las propiedades de los hormigones son importantes, la mayoría de los métodos están dirigidos a la obtención de cierta resistencia a la compresión con una consistencia determinada.

Se asume que, si esto se logra con éxito y el hormigón está bien especificado, las otras propiedades también serán satisfactorias.

1.4.1.2. Propiedades físico - mecánicas del hormigón.

❖ Hormigón fresco.-

Durante el período en que el hormigón se comporta como un líquido se lo denomina en estado fresco, siendo el producto inmediato del amasado de sus componentes. El lapso dura aproximadamente entre 1 y 3 horas.

a) Trabajabilidad (Docilidad):

Es la facilidad que tiene el hormigón para ser amasado, manipulado y puesto en obra, con los medios de compactación que se disponga, dependiendo de:

- Cantidad de agua de amasado: más agua mayor docilidad y menor resistencia.
- Contenido de árido fino: mayor contenido de arena mejor trabajabilidad, pero mientras

más arena es necesario más agua de amasado y baja la resistencia.

b) Homogeneidad:

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa.

c) Consistencia:

Es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica.

d) Peso Específico:

Ya sea compactado o sin compactar, es un índice de la uniformidad del hormigón durante la ejecución de una obra.

❖ **Hormigón Endurecido.-**

a) Permeabilidad

Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón.

b) Dureza

Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro Schmidt.

c) Resistencia a la Compresión

Las especificaciones de hormigón exigen una resistencia a la compresión a 28 días, aunque no necesariamente es la condición dominante. Un hormigón no puede tener más resistencia a la compresión que los áridos que lo conforman.

- **Resistencia Característica:** Valor de la resistencia a la compresión del hormigón

simple tal que, si se ensayan varias muestras en el laboratorio, el 95 % de las probetas tienen resistencias mayores o iguales.

- **Resistencia Media:** Es la media aritmética entre las resistencias a compresión obtenidas de varias muestras de hormigón.

1.4.2. Componentes del hormigón.

1.4.2.1. Agregados.

Es el término que se emplea para definir al material pétreo que se utiliza en el hormigón, independientemente de su tamaño. El término agregado abarca a las arenas, gravas naturales y piedra triturada, y también a los materiales especiales utilizados para producir hormigones livianos y pesados.

Los agregados conforman el esqueleto granular del concreto y es el elemento mayoritario ya que representa el 80-90% del peso total de concreto, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo.

Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.

Funciones de los agregados:

- Bajar el costo del hormigón.
- Comunicar su resistencia a la compresión del hormigón.
- Reducir los cambios volumétricos (retracción) durante el fraguado, ya que el cemento disminuye su volumen al fraguar.

1.4.2.2. Propiedades de los agregados.

❖ Agregado Fino

a) Granulometría

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación del árido fino. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la

información necesaria para el control de la producción de diversos productos que contengan áridos.

La granulometría del agregado fino debe cumplir con los límites de la norma (ASTM C-33), generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos.

Los límites establecidos por la norma con respecto al tamaño de las partículas se indican a continuación:

Tabla 1.- Tamaño de Tamices ASTM C-33

TAMAÑO DE LA MALLA	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (N°. 4)	95 a 100
2.36 mm (N°. 8)	80 a 100
1.18 mm (N°. 16)	50 a 85
0.60 mm (N°. 30)	25 a 60
0.30 mm (N°. 50)	10 a 30
0.15 mm (N°. 100)	2 a 10

Fuente: ASTM C-33. Especificación Normalizada para agregados en el concreto

Tenemos diferentes tipos de granulometría:

- **Bien Graduada.-** Se obtiene cuando el agregado presenta una distribución uniforme de mayor a menor. Su gráfico es una línea continua.
- **Mal Graduada.-** No hay una continuidad entre el porcentaje de cada tamiz, es decir, la curva graficada presentará desviaciones.
- **Uniforme.-** Se presenta cuando el agregado tiene partículas del mismo tamaño.
- **Abierta o Discontinua.-** Se produce cuando en ciertos tamices no se ha retenido material, la curva es discontinua, presenta interrupciones

b) Módulo de finura

El módulo de finura (MF) del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C-125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas. El módulo de finura es un índice de la finura del agregado fino, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado.

Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15mm (No.100), 0.30mm (No.50), 0.60mm (No.30), 1.18mm (No.16), 2.36mm (No.8), 4.75mm (No.4), 9.52mm (3/8”), 19.05mm (3/4”), 38.10mm (1½”), 76.20mm (3”), y 152.40mm (6”).

“Se considera que el módulo de finura de una arena adecuada para producir hormigón, debe estar entre 2,3 y 3,1 donde un valor menor que 2,0 indica una arena fina; 2,5 una arena de finura media y más de 3,0 una arena gruesa”. (Bowles, 2006)

c) Densidad Relativa

Es la característica generalmente utilizada para el cálculo del volumen ocupado por el árido en las mezclas que contienen áridos, incluyendo hormigón de cemento portland, hormigón bituminoso y otras mezclas que son dosificadas o analizadas en base al volumen absoluto. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9. Este ensayo se realiza bajo la norma NTE INEN 856.

d) Contenido de Humedad

Este ensayo se lo realiza en base a la norma NTE INEN 862, que consiste en la cantidad de agua que contiene el agregado en un momento dado. Las partículas de agregado pueden pasar por cuatro estados, los cuales se describen a continuación:

- **Seco al horno (SECO):** Toda la humedad externa es eliminada por calentamiento a una temperatura de 110 °C.
- **Humedad Natural:** Cuando no hay humedad libre o superficial.
- **Saturado superficie seca (SSS):** Cuando no hay humedad libre o superficial, pero todos los poros de la partícula están llenos de agua.
- **Saturado Superficie Húmeda (SSH):** Cuando hay humedad superficial, la partícula está visiblemente mojada, y todos sus poros están llenos de agua.

e) Peso Volumétrico

Se lo realiza en base a la norma NTE INEN 858, para determinar la masa unitaria (peso volumétrico) del árido en condición compactada o suelta y así calcular los vacíos entre las partículas.

❖ **Agregado Grueso**

a) Granulometría

De acuerdo a la Norma ASTM E-11 la serie de tamices utilizados para agregado grueso son 2", 1½", 1", ¾", ½", 3/8", # 4. La granulometría del agregado grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones del agregado fino, con relación a la cantidad total de agregados, producen un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso. (Bowles, 2006)

b) Tamaño Nominal Máximo

Es el tamaño del tamiz comercial anterior al primer tamiz en el que hubo el 15% o más retenido.

El tamaño nominal máximo del agregado grueso influye en la economía del concreto. Normalmente, se requiere más agua y cemento en concretos con agregados gruesos de tamaño máximo menor si comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del agregado.

Por lo común el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

- Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
- Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo.
- Un tercio del peralte de las losas.

c) Densidad Relativa

Se realiza en base a la norma ASTM C 127-80, NTE INEN 857. Este método de ensayo se aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido grueso (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido.

Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad es expresada como: seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente.

d) Resistencia al Desgaste

Ésta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, menor de 1/2" (38 mm).

El objetivo de este ensayo, como se lo indica en la norma NTE INEN 860 (ASTM - C131), es medir el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento superficial en una muestra de agregado de granulometría preparada.

1.4.3. Caucho.

Caucho (materia prima) látex producido por varias moráceas y eufobiáceas intertropicales, entre las que se destaca la *Hevea Brasiliensis*. Cuando por cortes o incisiones se rompen los conductos lactíferos de los árboles productores de caucho, estos segregan un líquido lechoso y turbio que contiene el caucho en suspensión y dividido en pequeñas gotitas de aspecto emulsionado. Como la secreción es relativamente abundante la misma se recoge en recipientes especiales en forma de pequeños baldes que se cuelgan al término de las incisiones; luego el jugo recolectado es sometido a un tratamiento para solidificarlo por evaporación o coagulación, ahumado, etc. en el mismo lugar de la cosecha.

El caucho es el cuerpo sólido que tiene el mayor coeficiente de dilatación conciso y que aumenta considerablemente con la vulcanización. Un corte reciente de caucho crudo, o sea sin vulcanizar, se puede volver a unir soldándose entre sí con solo presionar uno contra otro. Una vez vulcanizado pierde esta propiedad pero adquiere una mayor elasticidad, pudiendo alargarse hasta seis veces su longitud primitiva. El alargamiento del caucho vulcanizado es acompañado de una elevación de temperatura y en cambio se produce un enfriamiento cuando retorna a su estado normal. Por síntesis se han elaborado diferentes productos de propiedades físicas parecidas a las del producto vegetal. (Castro, 2008)

El vulcanizado del caucho y su posterior desarrollo en neumáticos por Charles Goodyear fue un hecho sobresaliente que afectó nuestra calidad de vida en los pasados 150 años, incluyendo el desarrollo de automóviles que sin llantas vulcanizadas, no podrían funcionar. Las llantas o neumáticos, y por lo tanto, los automóviles son una parte importante de la sociedad moderna y, sin embargo no todos los países son capaces de producir automóviles.

El futuro de la industria de neumáticos, a pesar de la disminución de los suministros de petróleo, es brillante. No obstante, de los recursos de potencia usados para propulsar nuestros carros, camiones, bicicletas, motocicletas y aeroplanos, los neumáticos permanecerán cumpliendo con la misma función de aquellas que existían en el pasado.

1.4.3.1. Neumáticos.

Compuesto básicamente de caucho copolímero estireno-butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25 % en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR¹. El negro de humo se da debido a partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste. Además las fibras reforzantes: textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos: algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante. Para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, se adiciona plastificante utilizándose para el control de la viscosidad.

Los neumáticos cuentan con gran diversidad de compuestos incluyendo agentes naturales y compuestos. Los constituyentes principales de los neumáticos son los polímeros, negro de carbono y ablandadores.

Por ejemplo, un neumático de 9 kg está compuesto en un 60% de caucho, 20% de acero y 20% de fibra y otros productos.

A pesar de que los neumáticos representan poco dentro de los residuos urbanos, ameritan un abordaje especial por sus características, tamaño e impacto ambiental.

¹ SBR (del inglés Styrene-Butadiene Rubber) es un elastómero sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. Es el caucho sintético con mayor volumen de producción mundial. Su principal aplicación es en la fabricación de neumáticos.

El neumático de un auto o camioneta, pesa aproximadamente 9,5 kg y el correspondiente a manejo industrial o a camiones pesados, puede variar desde 16 a 100 kilogramos. El mayor porcentaje de neumáticos descartados corresponde a los provenientes de autos y camionetas livianas.

A continuación se explica el proceso utilización del caucho para la fabricación de neumáticos dentro de la ingeniería industrial.

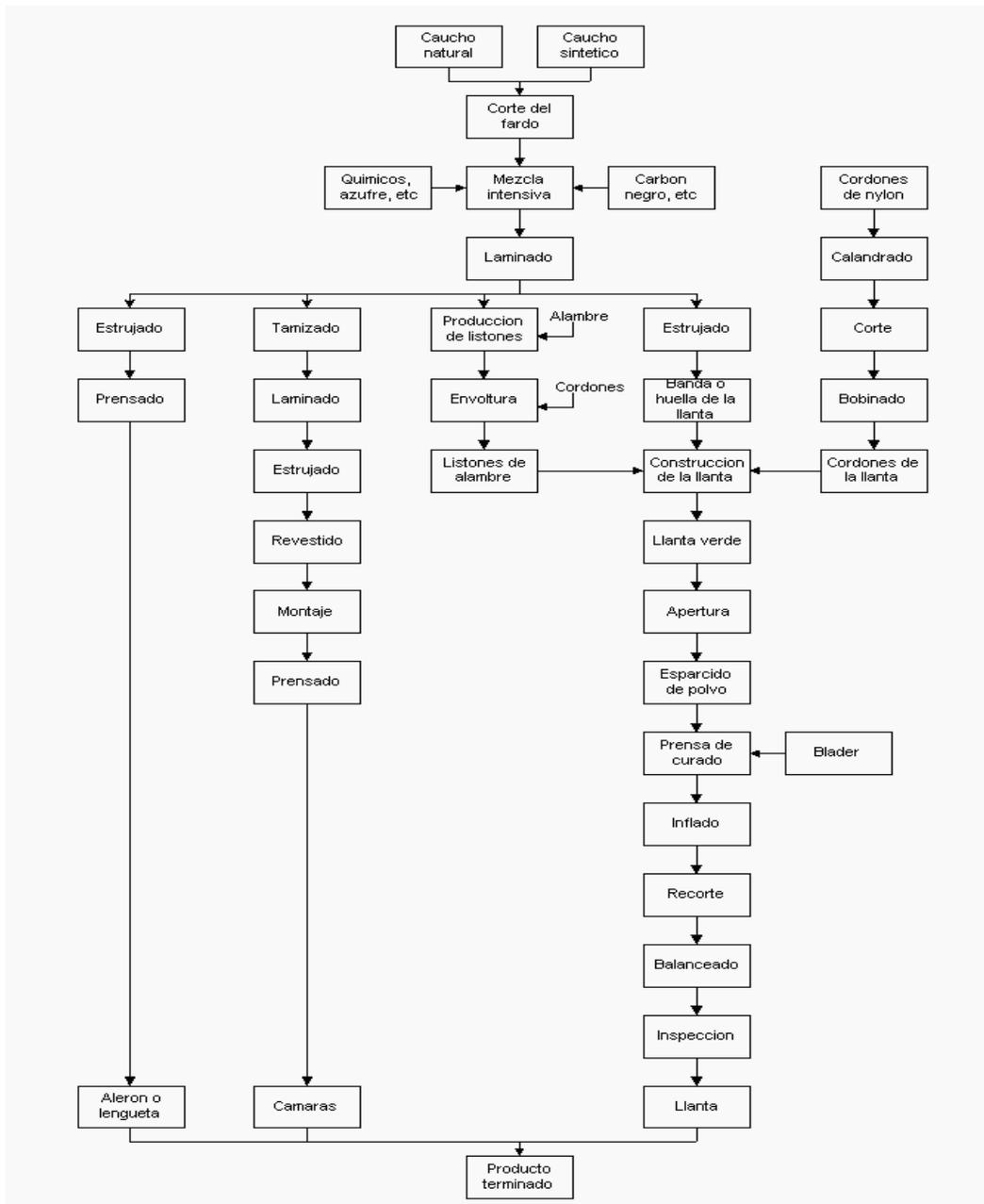


Ilustración 1.- Diagrama del proceso de fabricación de neumáticos. (Neumático, 2015)

1.4.3.2. Hormigón reciclado.

El hormigón reciclado surge tras las demoliciones de grandes edificaciones las cuales producen desechos o escombros del hormigón, estas son nuevamente reutilizadas para su elaboración, este tipo de mezcla no es más que la utilización de desechos de hormigón viejo obtenido de estructuras antiguas, el cual es triturado nuevamente para ser utilizado como agregado reciclado.

El agregado de hormigón reciclado se usa principalmente para la reconstrucción de pavimentos y se están realizando estudios para poder utilizarlo como un hormigón de carácter estructural. Este se ha utilizado gratificadamente como un agregado para sub bases granulares, suelo cemento, en estructuras de poca envergadura y como reemplazo parcial del agregado nuevo.

Por otro lado el hormigón reciclado también se puede obtener sin necesidad de usar agregados provenientes de la construcción, sino provenientes de otros campos de trabajo como lo son: el uso del caucho, vidrio, tapas de plástico, y muchos materiales que cuentan con características parecidas a las de los agregados comúnmente utilizados para el hormigón convencional.

Este tipo de hormigón también se origina por la necesidad de reducir la contaminación en el medio ambiente lo cual es una gran problemática que ataca a la población y al país. Al pasar del tiempo el hombre ha ido explotando todo tipo de recursos existentes en la tierra, estos han sido muy fáciles de obtener debido a la demanda que este produce y al gran crecimiento de la población, lo cual ha ocasionado un gran daño hacia el medio ambiente, lo cual desencadenó por medio de este tipo de hormigón obtener una disminución al deterioro del ecosistema.



Ilustración 2.- Construcción de vivienda por medio de hormigón reciclado.

1.4.3.3. Composición de los neumáticos.

Están compuestas de una gran cantidad de materiales que les dan, dependiendo del uso al cual se destinan, sus características especiales como resistencia a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros.

Tabla 2.- Materiales constituyentes del neumático.

Material	Composición (%)	
	Automóviles	Camiones
Caucho	48	43
Negro de carbono	22	21
Metal	15	27
Textil	5	0
Óxido de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	6

Fuente: Medio Ambiente, Calidad ambiental

Según la Rubber Manufacturers Association, se tiene otra versión acerca de la composición y características de los diferentes tipos de neumáticos:

Tabla 3.- Neumáticos de Pasajeros (automóviles y camionetas)

Material	Composición
Caucho natural	14 %
Caucho sintético	27 %
Negro de humo	28 %
Acero	14 - 15 %
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17 %
Peso promedio	8,6 kg
Volumen	0,06 m3

Fuente: Rubber Manufacturers Association

Tabla 4. - Neumáticos MCT (camiones y microbuses)

Material	Composición
Caucho natural	27 %
Caucho sintético	14 %
Carbón negro	28 %
Acero	14 - 15 %
Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17 %
Peso promedio	45,4 kg
Volumen	0,36 m3

Fuente: Rubber Manufacturers Association

1.4.3.4. *Propiedades del material de los neumáticos.*

a) **Propiedades Caucho Natural y Otros Elastómeros Sintéticos.**

En la siguiente tabla podemos observar la relación de algunas de las principales propiedades entre el caucho natural vulcanizado y otros elastómeros sintéticos. Se observa el bajo valor tensional y la alta elongación que poseen:

Tabla 5 .- Propiedades Caucho Natural vs Elastómeros Sintéticos

Elastómero	Resistencia a la Tracción PSI	Elongación %	Densidad g/cm³
Caucho natural vulcanizado	2,5 – 3,5	750 – 850	0,93
SBR	0,2 – 3,5	400 – 600	0,94
Neopreno	3 – 4	800 – 900	1,25
Silicona	0,6 – 1,3	100 - 500	1,1 – 1,6

Fuente: Rubber Manufacturers Association

Debido a que el caucho representa la base de los neumáticos es este también el que marca la pauta sobre su comportamiento, mientras que los otros materiales únicamente actúan como un refuerzo para éste, incrementando sus resistencias pero sin tener incidencia en el tipo de comportamiento que presenta. Es por esto que todas sus propiedades dependen de la fórmula que se utilice para la fabricación del caucho.

El caucho tiene fases viscosas así como elásticas. Cuando el caucho se deforma, se involucra absorción de energía, parte de la cual se regresa cuando el caucho regresa a su forma original. La parte de la energía que no retorna como energía mecánica es disipada en forma de calor en el caucho. Es por ello que frecuentemente se usa para aplicaciones en las cuales pasa por deformaciones rápidas y cíclicas a una cierta frecuencia de un rango de frecuencias. Las propiedades mecánicas dinámicas son extremadamente dependientes de la temperatura.

Sin embargo en general se pueden mencionar las siguientes propiedades:

- **Mecánicas:** moderada resiliencia, excelente resistencia a la abrasión, moderada resistencia al desgarro, excelente resistencia al impacto, moderada resistencia a la flexión.

- Físicas: temperatura de servicio de hasta 70°C, resistencia a la intemperie, excelente resistencia eléctrica, permeabilidad a los gases.
- Químicas: buena resistencia al agua, no posee resistencia a los hidrocarburos, baja resistencia a los ácidos diluidos, resistencia a los aceites.

1.4.3.5. Proceso de trituración de los neumáticos para su reciclaje.

El objetivo del proceso de trituración consiste en reducir el tamaño de las llantas a través de máquinas trituradoras con el fin de separar el caucho de elementos como el acero y los textiles, este grano de caucho triturado se puede emplear para la elaboración de nuevos productos.

Actualmente se encuentran dos métodos de trituración que son la trituración mecánica y la trituración criogénica.

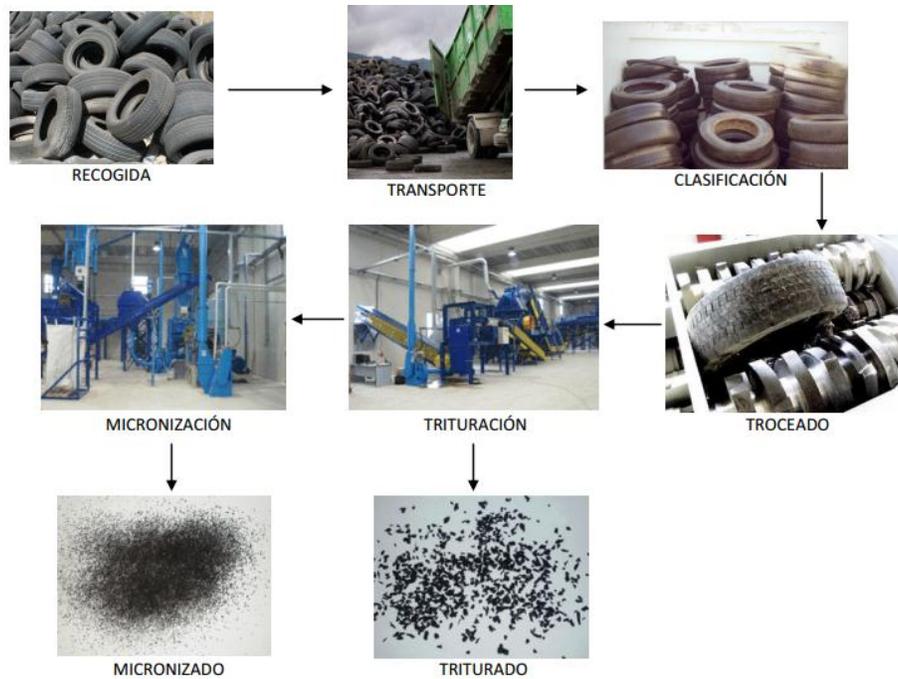
a) Trituración mecánica.

El proceso de trituración mecánica se realiza mediante molinos de cuchillas, en tres etapas que partiendo de los neumáticos enteros conducen a tamaños de entre 5 – 10 cm la primaria, a unos 6 mm la secundaria y prácticamente a polvo de caucho la terciaria. (Gestión del medio Ambiente, 2005)



Ilustración 3.- Tamaño de grano triturado en el mercado.

b) Diagrama de procesos mediante trituración mecánica.



Ver el Anexo 60.- Producción de la fibra de caucho en la empresa FACERQUIM



Ilustración 4.- Tipos de polímero elástico suministrados por la empresa FACERQUIM.

c) Trituración criogénica.

En esta los neumáticos se someten a un intenso enfriamiento, de -80°C , producido por tratamiento con nitrógeno líquido.

El neumático se fragiliza facilitando su trituración, haciendo así más fácilmente separable el caucho del acero y del textil. Las etapas del proceso son: trituración previa para los neumáticos mayores, congelación criogénica, triturador de trozos de neumáticos, separación de componentes usando separadores magnéticos y neumáticos.

Mediante esta operación se puede conseguir moler los neumáticos hasta un tamaño de 0.5 mm, permitiendo el reciclado de los componentes. Es un proceso más eficaz que la trituración mecánica. (Gestión del medio Ambiente, 2005)



Ilustración 5.- Caucho granulado.

1.4.3.6. Problemas ambientales derivados de su mala disposición.

Las llantas usadas proponen grandes problemas. Su resistencia a la trituración y posterior compactación descarta su utilización como material de relleno del suelo, su durabilidad genera una gran dificultad para transformarlas en otros productos y finalmente, su baja eficiencia para almacenar en centros de acopio y su costo de transporte, debido a su volumen, hace necesario invertir muchos recursos para este efecto. Por lo tanto, su disposición adecuada se complica, a veces, se encuentran mal almacenadas o quemándose al aire libre. Los problemas de salud y medio ambiente asociados con el almacenamiento o combustión de las llantas al aire libre son muchos y todos resultan muy dañinos, los principales están asociados con:

- **Almacenamiento de las llantas al aire libre:** las llantas almacenadas al aire libre muchas veces favorecen la proliferación de roedores, insectos, culebras y otros animales dañinos para la salud del ser humano, por lo que este tipo de almacenamiento pone en serio riesgo a las poblaciones adyacentes a estos botaderos.
- **Combustión de las llantas:** la quema de llantas a cielo abierto provoca graves problemas ambientales, ya que produce emisiones de gases que contienen contaminantes carcinogénicos (causan cáncer) y muta génicos (problemas en desarrollo de bebés) como los compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos.

Estas quemas representan un peligro para la salud, a corto plazo (agudo) y crónicos significativos a los residentes y trabajadores próximos, incluyendo: irritaciones de la piel, irritaciones de los ojos, irritaciones del sistema respiratorio y de las membranas mucosas, la depresión del sistema nervioso central, cáncer, y efectos muta génicos (como por ejemplo defectos físicos, abortos, o al cáncer al nacimiento).

1.4.3.7. Formas de reciclaje actuales.

Actualmente en el país no se cuenta con un método de reciclaje que utilice la totalidad de los neumáticos desechados. Sin embargo existen ciertos métodos de reutilizar las llantas de todo tipo.

- **Reencauche:** este consiste en la reposición de la banda de rodamiento ya desgastada, sobre el casco de la llanta, por otra banda que se adhiere a él. Sin embargo este tipo de actividad no contempla a todas las llantas que se producen, debido a que la fabricas de llantas en la actualidad, diseñan dichos elementos con una edad de obsolescencia programada. En general el reencauche solo puede aplicarse a llantas de vehículos de transporte pesado.
- **Transformación para su uso en otros productos:** al pasar por un proceso de trituración, se pulverizan, convirtiéndose así en polvo y arena plástica, para su reutilización en la fabricación de productos de uso diario como: suelas de zapatos, macetas, mangueras, juegos infantiles, o en construcción de infraestructura como loseta o para la pavimentación de avenidas y carreteras. Además del hule, el alambre de acero y las cuerdas de nylon se pueden vender a empresas fundidoras para su posterior reutilización.
- **Utilización en la industria cementera:** en el caso de la producción de cemento las llantas pueden ser utilizadas como combustible para los hornos en los que se produce el cemento.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1. TIPO DE ESTUDIO

Analítico – Experimental: El presente estudio se lo realizó en el laboratorio de Ingeniería Civil durante ocho meses, mediante la elaboración del hormigón convencional y hormigón modificado, con adición de fibras de polímeros elásticos (neumáticos) reciclados, preparando mezclas con diferentes dosis de polímeros, para luego proceder a realizar los respectivos ensayos antes y después del fraguado. La condición, características y cantidad del polímero elástico influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón convencional.

Para su desarrollo se realizó una investigación bibliográfica, es decir buscar información de estudios realizados previamente, tanto como las propiedades de los materiales a emplear (agregados, cemento, agua y polímero elástico).

Se realizó ensayos para analizar las propiedades de los materiales empleados tales como: porcentaje del contenido de humedad, absorción, densidad SSS de los agregados. La investigación se basa de acuerdo a la Norma INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización).

Se prepararon compuestos de hormigón convencional, los cuales están formados por agregados finos y gruesos, agua y cemento.

El agregado fino empleado es un subproducto de la trituración del material rocoso de la cantera Cerro Negro. Castro Hnos. (Riobamba). El agregado grueso es ripio triturado de la misma cantera. El cemento utilizado es el Pórtland tipo I. El polímero elástico proviene de los neumáticos en desuso, fue suministrado por la empresa FACERQUIM ubicada en la ciudad de Ambato.

Se elaboraron mezclas de hormigón convencional y hormigón con polímero elástico, mediante el método por densidad óptima. La adición de diferentes porcentajes de polímero elástico fue de (2, 5, 7, 10 %) de acuerdo al peso del agregado fino en la dosificación, para luego proceder a encontrar la adición óptima de polímero a la mezcla.

Con la adición óptima de polímero elástico, se procede a elaborar la dosificación final, en donde la relación agua/cemento se mantuvo constante en 0.525, y se sustituyó parte del agregado grueso que se adiciona al hormigón por polímero elástico, el contenido de agregado fino permanece constante.

Se realizaron diferentes ensayos antes y después del fraguado, tales como:

Tabla 6.- Los ensayos que se realizaron antes y después del fraguado del hormigón

ANTES DEL FRAGUADO	DESPUÉS DEL FRAGUADO
Revenimiento o Cono de Abrams	Resistencia a la compresión
Densidad	Módulo de elasticidad
Rendimiento	Resistencia a la tracción por compresión diametral
Contenido de aire	Resistencia a la flexión
	Densidad, Absorción y Porosidad
	Adherencia hormigón - refuerzo

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Los ensayos mecánicos se evaluaron en una edad de 28 días y en el caso de la resistencia a la compresión se ensayaron a los 3, 7, 28 y 56 días. Se procedió a comparar las características y propiedades del hormigón convencional en relación al hormigón modificado. Se analizan las propiedades para ver si puede ser una alternativa como hormigón estructural.

2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

2.2.1. Población.

“Población es el total de los individuos o elementos a quienes se refiere la investigación, es decir, todos los elementos que vamos a estudiar, por ello también se llama universo” (Hurtado, 1998, p.5.)

En esta investigación la población son las probetas de hormigón con el diseño de mezcla convencional normalmente utilizado en la construcción, con las cuales se han realizado ensayos para determinar las propiedades mecánicas.

2.2.2. Muestra.

“Una muestra es una parte representativa de una población, cuyas características deben producirse en ella, lo más exactamente posible”.
(Balestrini, 2006)

Por otro lado las muestras son las probetas de hormigón modificado con adición de polímero elástico (neumático) variando sus porcentajes (2, 5, 7 y 10%). Con los respectivos ensayos se determinó las propiedades físicas y mecánicas del hormigón modificado. En la presente investigación se trabajó con cuatro dosis de adición del polímero elástico para proceder a determinar la cantidad óptima.

Se contactó a la empresa del Ing. Fabara, que se encuentra en la ciudad de Ambato donde procesan los neumáticos en desuso con el fin de aprovechar este material y darle un nuevo uso entre los cuales están: sustrato para jardinería, superficies seguras para parques de diversión (elementos de protección), caucho pulverizado o granulado que sirven para las canchas sintéticas y aplicaciones de ingeniería como son materiales compresibles para juntas de dilatación.

2.2.2.1. Aceptabilidad del hormigón.

Por lo general la aceptabilidad del hormigón se basa en ensayos a los 28 días, pero puede especificarse para cualquier otra edad, más temprana o más tardía. Ha sido necesario desarrollar un procedimiento de evaluación que permita establecer los límites de aceptabilidad en función no sólo de los resultados de los ensayos de las probetas, sino de la posible regularidad de la producción del hormigón y de las exigencias, derivadas del tipo de obra.

- Encontrar el promedio general X , que será conocido también como $f^{\circ}cr$.

$$X = \frac{\sum xi}{N}$$

- Hallar la desviación estándar.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum xi - \frac{\sum xi}{N}}{N - 1}}$$

- Luego el factor de mayoración k.

Tabla 7.- Factor de modificación para la desviación estándar.

Número total de ensayos considerados	Factor k para incrementar la desviación estándar
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 o más	1,00

Fuente: Norma INEN 1855-2:2002 Anexo B

Se puede realizar una interpolación lineal para un número de ensayos dentro de este rango. De requerir un factor de mayoración (k), cuyos números de ensayos estén fuera del rango tabulados se puede obtener basándose en esta curva:

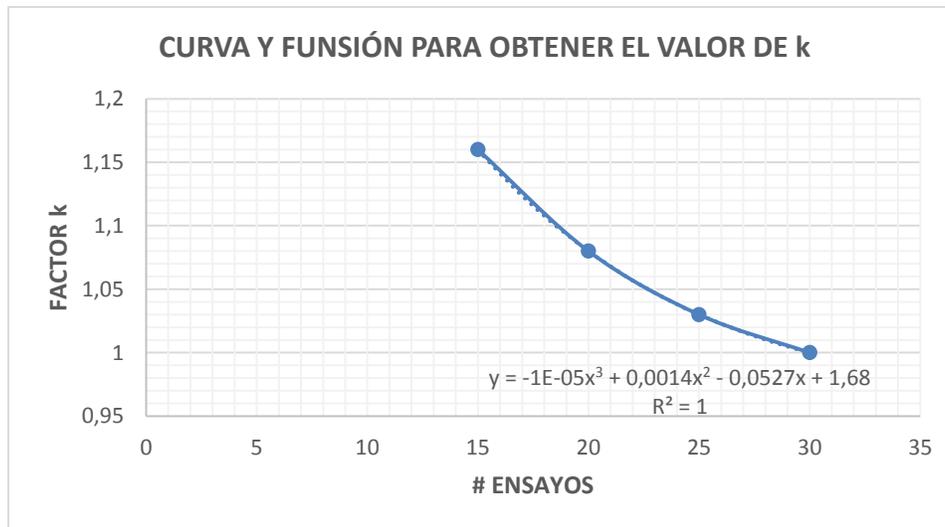


Ilustración 6.- Ecuación polinómica de tercer orden para encontrar el valor de k.

- Al final obtendremos el valor real del f'c.

$$f'c = f'cr - 1,34 * k * \delta$$

Dónde:

$X = f'cr$. Promedio general de los ensayos

x_i = Son los resultados de cada ensayo

N = Es el total de ensayos

δ = Desviación estándar

k = Factor de mayoración

2.2.2.2. Número de probetas elaboradas para determinar las propiedades.

Para la investigación planteada se elaboró varios lotes de hormigón convencional y modificado con diferentes porcentajes de adiciones de polímero elástico. El método de diseño se lo realizó por densidad óptima.

En la siguiente tabla, se determina los ensayos y el número de probetas desarrolladas con el hormigón convencional para determinar las propiedades mecánicas.

Tabla 8.- Ensayos para determinar las propiedades del hormigón convencional.

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)			Total Probetas
		3	7	28	
Resistencia a la compresión	INEN 1573	6	6	6	18
Módulo de elasticidad	INEN 1850				
Resistencia a la tracción por compresión diametral	INEN 2648			6	6
Resistencia a la flexión	INEN 2554			6	6
Densidad, Absorción y Porosidad	ASTM C 642			6	6
Adherencia con refuerzo				6	6

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

En la siguiente tabla de acuerdo a los ensayos, definimos el número total de probetas: Cilindros para los ensayos mecánicos (compresión, resistencia a la tracción, densidad,

absorción y porosidad), vigas para los ensayos a flexión y cubos de 100 x 100 x 100 mm para ensayos de adherencia entre hormigón – refuerzo.

Los ensayos mecánicos se evaluaron en una edad de 28 días y en el caso de la resistencia a la compresión se ensayaron las muestras a los 3, 7, 28 y 56 días. Además, se indica las proporciones de polímero elástico (2, 5, 7 y 10%) en relación al peso de los agregados.

Tabla 9.- Ensayos para encontrar el valor óptimo de adición.

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón(Días)																Total Probe tas
		3				7				28				56				
		Adición Polímero (%)																
		2	5	7	10	2	5	7	10	2	5	7	10	2	5	7	10	
Resistencia a la compresión	INEN 1573	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	96
Módulo de elasticidad	INEN 1850																	
Resistencia a la tracción por compresión diametral	INEN 2648									6	6	6	6					24
Resistencia a la flexión	INEN 2554									6	6	6	6					24
Densidad, Absorción y Porosidad	ASTM C 642									6	6	6	6					24
Adherencia con refuerzo										6	6	6	6					24

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Luego de encontrar la adición óptima de polímero elástico, se procede a realizar ensayos con la dosificación óptima del hormigón modificado.

Tabla 10.- Ensayos con el porcentaje óptimo de polímero elástica.

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón(Días)
		28
Resistencia a la compresión	INEN 1573	10
Módulo de elasticidad	INEN 1850	
Resistencia a la tracción por compresión diametral	INEN 2648	10
Resistencia a la flexión	INEN 2554	10
Densidad, Absorción y Porosidad	ASTM C 642	10
Adherencia con refuerzo		10

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

2.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable Independiente:

Adición de fibras de polímero elástico.

Condiciones, características y cantidad del material empleado.

Costo del material.

Variable Dependiente:

Propiedades del hormigón modificado.

Porcentaje de adherencia hormigón – refuerzo.

Costo de elaboración.

Operacionalización de variables:

VARIABLES	CONCEPTUALIZACIÓN	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
INDEPENDIENTES:				
Adición de fibras de polímero elástico.	<p>Conjunto de actividades en laboratorio (ensayos) y trabajo en gabinete (estudios), que dan la calidad y características de los materiales para obtener la dosificación.</p> <p>Se efectuara siguiendo una serie de pasos como:</p> <p>Realizar un plan de actividades.</p>	<p>Cantidad de fibras de polímero elástico.</p> <p>Dimensiones de la fibra de polímero elástico.</p> <p>Verificar la sustitución del Agregado fino o Agregado Grueso.</p>	<p>La cantidad en diferentes porcentajes de polímero elástico en relación al agregado.</p> <p>Diámetro: 1 – 3 mm Longitud: 2 – 3 cm</p> <p>Realización de formatos para los resultados de los ensayos.</p>	<p>Porcentajes 2, 5, 7, 10% de polímero elástico.</p> <p>Datos de dosificación del hormigón convencional de 28 MPa conferidos por el laboratorio de la Universidad Nacional de Chimborazo.</p>
Condiciones, características y cantidad del material empleado.	<p>Investigar y entender la teoría existente relacionada al tema de investigación con sus respectivas normas.</p>	<p>INEN. Normativas nacionales para realizar ensayos de laboratorio.</p>	<p>Experimentación de las dosificaciones para una resistencia de 28 MPa con adición de polímero elástico.</p>	<p>Diseño del Hormigón método densidad óptima.</p> <p>Verificación de los datos de la dosificación.</p>
Costo del material.	<p>Gestionar y comprar los materiales de acuerdo a una proforma.</p> <p>Elaborar las probetas del hormigón convencional y modificado de acuerdo a una dosificación establecida en los laboratorios de la UNACH.</p> <p>Analizar el porcentaje óptimo para la adición del polímero elástico.</p>	<p>Catálogos de empresas que proveen el polímero elástico.</p> <p>Información proporcionada del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo.</p>	<p>Realización de gráficos, esquemas comparativos, gráficas de pastel, barras, curvas, etc.</p> <p>Utilización de los equipos necesarios para la realización de los ensayos en los laboratorios.</p>	<p>Fichas y tablas para registro de datos.</p> <p>Normas INEN Y ASTM de los procesos a seguir de cada uno de los ensayos</p> <p>Instrumentos y materiales de Laboratorio.</p>

DEPENDIENTES:

<p>Propiedades del hormigón modificado.</p>	<p>Para la determinación de las propiedades mecánicas se realizaron ensayos, cuyos procesos de realización están normalizadas por la INEN Ecuatoriana y La Norma ASTM.</p>	<p>Ensayos antes del fraguado: Revenimiento o Cono de Abrams INEN 1578 Determinación de la Densidad, Rendimiento y Contenido de aire (Método Gravimétrico) INEN 1579</p>	<p>INEN. Normativas nacionales para realizar ensayos de laboratorio.</p>	
<p>Porcentaje de adherencia hormigón – refuerzo.</p>	<p>Para realización del ensayo de Adherencia para este modelo de hormigón no se cuenta con la normalización, por lo que haremos una propuesta de guía de ensayo.</p>	<p>Ensayos después del fraguado: Resistencia a la compresión INEN 1573 Módulo de elasticidad INEN 1850</p>	<p>Estudio técnico. Control estadístico.</p>	<p>Análisis de Precios unitarios. Aplicación de Normativas.</p>
<p>Costo de elaboración.</p>	<p>El costo del desarrollo del hormigón modificado dependerá de la procedencia de los materiales a emplearse en la misma.</p>	<p>Resistencia a la tracción por compresión diametral INEN 2648 Resistencia a la flexión INEN 2554 Densidad, Absorción y Porosidad ASTM C 642 Adherencia entre hormigón modificado -refuerzo.</p>	<p>Observación. Fotografía. Check List</p>	<p>Fichas recolección de datos. Tabulación y análisis de datos.</p>

2.4. PROCEDIMIENTOS

Se presenta el siguiente ordenador gráfico, para explicar de la mejor manera el procedimiento que se ha seguido en la presente investigación.

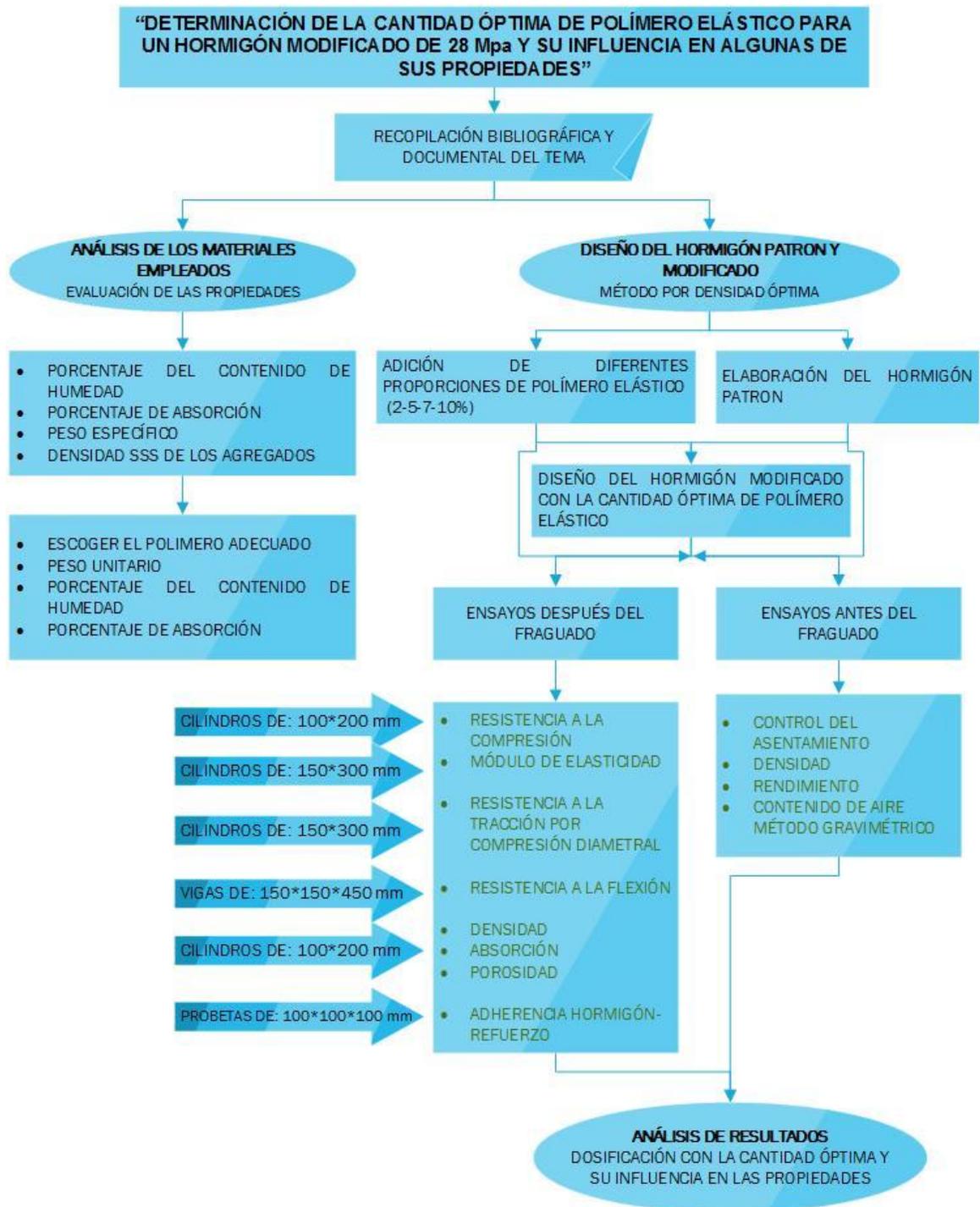


Ilustración 7.- Esquema del procedimiento seguido en la investigación.

La presente investigación se lo realizo en las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, ubicada en el Campus Norte "Ms. Edison Riera R." Avda. Antonio José de Sucre, Km. 1 1/2 Vía a Guano.

En donde realizamos diversos ensayos, las técnicas que utilizamos son la observación y la experimentación, mediante la cual recopilamos todos los datos y resultados en informes tabulados para su debida interpretación, y de esta manera elaborar el diseño de un hormigón modificado con adición de polímeros elásticos.

2.4.1. Ensayos de los materiales empleados en el hormigón modificado.

2.4.1.1. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (gravedad específica) y absorción de los áridos.



Ilustración 8.- Proceso para determinar la densidad SSS de los áridos.

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad promedio en una muestra de árido (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas) y la absorción de los áridos.

Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad es expresada como: seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente. La densidad SSS, densidad relativa SSS y la absorción se determinan luego de saturar el árido en agua por un periodo definido.

a) Absorción:

Incremento de la masa del árido debido a la penetración de agua en los poros de las partículas durante un determinado período de tiempo, sin incluir el agua adherida a la superficie externa de las partículas, se expresa como un porcentaje de la masa seca.

b) Seco al horno (SH):

Condición en la cual los áridos han sido secados por calentamiento en un horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por el tiempo necesario para conseguir una masa constante.

c) Saturado superficialmente seco (SSS):

Condición en la cual los poros permeables de las partículas del árido se llenan con agua al sumergirlos por un determinado período de tiempo, pero sin agua libre en la superficie de las partículas.

d) Densidad (SSS):

Masa de las partículas del árido, saturado superficialmente seco, por unidad de volumen, incluyendo el volumen de poros impermeables y poros permeables llenos de agua, sin incluir los vacíos entre partículas.

e) Resumen:

Se sumerge en agua por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$, una muestra de árido previamente secada, hasta conseguir masa constante, con el propósito de llenar con agua sus poros. Se retira la muestra del agua, se seca el agua superficial de las partículas y se determina su masa.

Luego, se coloca la muestra (o parte de esta) en un recipiente graduado y se determina el volumen, por el método del desplazamiento de agua para árido grueso y método gravimétrico o volumétrico para el árido fino.

Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa. Utilizando el valor de masa obtenido y mediante las diferentes fórmulas es posible calcular la densidad y la absorción.

f) Normas y especificaciones:

Los ensayos se realizaron de acuerdo al Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN):

En las siguientes normas, encontramos los equipos necesarios para cada ensayo, el muestreo del árido, los procedimientos, los cálculos, y el formato del informe de los resultados.

NORMAS	DESCRIPCIÓN
NTE INEN 857:2010	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
NTE INEN 856:2010	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.

2.4.1.2. *Porcentaje del Contenido total de Humedad de los áridos.*



Ilustración 9.- Proceso para determinar el porcentaje del contenido de humedad de los áridos.

El objetivo es determinar el porcentaje de humedad evaporable por secado en una muestra de áridos, tanto el correspondiente a la humedad superficial, como la humedad contenida en los poros del árido. No determina las variaciones que puedan presentarse en el depósito.

a) Resumen:

Una muestra de masa normalizada en estado natural es secada en horno hasta eliminar la humedad tanto superficial como aquella ubicada entre los poros del árido. La cantidad de agua evaporada expresada en porcentaje respecto de la masa seca es la humedad de árido.

b) Normas y especificaciones:

Los ensayos se realizaron de acuerdo al Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN):

2.4.1.3. Porcentaje del contenido de Humedad del polímero elástico.



Ilustración 10.- Proceso para determinar el porcentaje del contenido de humedad del polímero elástico.

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de humedad total en una muestra de polímero elástico por medio del secado. Los polímeros elásticos poseen un grado de humedad, el cual es de gran importancia ya que con él podríamos saber si nos aporta humedad a la mezcla. El contenido de humedad es la cantidad total del agua que contiene la muestra del polímero al momento de efectuar la determinación de la masa, puede estar constituida por la suma del agua superficial y la absorbida.

a) Instrumental y equipos:

- Balanza
- Horno ventilado
- Recipiente para la muestra
- Una cuchara o espátula de metal

b) Procedimiento:

- Realizar el muestreo de una parte representativa de polímero elástico que está siendo ensayado, y que tenga una masa no menor a 1000 gr. Proteger la muestra frente a la

pérdida de humedad, antes de determinar su masa.

- Secar la muestra completamente en el recipiente por medio del horno ventilado, cuidando no perder material. Un calentamiento muy rápido puede causar que el caucho adquiera una textura de plástico pegajoso.
- Usar un horno de temperatura controlada, por lo que el calor excesivo puede alterar las propiedades del polímero elástico. La temperatura recomendada es de 80 °C durante 24 horas. Si se utiliza una fuente de calor diferente al horno de temperatura controlada, agitar la muestra durante el secado para acelerar la operación y evitar el sobrecalentamiento localizado.
- Para poder comprobar, la muestra está completamente seca cuando un mayor tiempo de calor ocasiona, o puede ocasionar, una pérdida adicional de la masa menor al 0,1%. Es decir cuando se han obtenido masas constantes.
- Determinar la masa de la muestra seca, con una aproximación de 0,1%, luego de que se haya enfriado lo suficiente como para no dañar la balanza.
- Calcular el contenido total de humedad evaporable de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de Humedad} = \frac{\text{Masa de la muestra inicial} - \text{Masa de la muestra seca}}{\text{Masa de la muestra seca}} \times 100$$

2.4.2. Método de Diseño.

2.4.2.1. Dosificación de hormigón empleando el método de densidad óptima.



Ilustración 11.- Elaboración del hormigón y marcado de los especímenes para su identificación

Con la ayuda de este método se puede determinar las cantidades necesarias de agua, cemento y agregados que deben emplearse para elaborar el hormigón deseado.

El fundamento de este método de diseño de mezclas, es la de utilizar la cantidad de pasta mínima necesaria para obtener un hormigón de buena calidad, para lo cual debemos obtener una combinación de granulados que deje el menor porcentaje de vacíos.

Datos de los materiales a emplear en la dosificación y unidades:

	Densidad sss g/cm ³	HUM %	ABS %	MUS g/cm ³
Agregado Grueso	X	X	X	X
Agregado Fino	X	X	X	X

MUS cemento =	X	g/cm ³
Densidad CEMENTO =	X	g/cm ³
Densidad Óptima =	X	
Densidad HORMIGÓN =	X	
% MEZCLA DE A.F =	% X	Proporción de la mezcla
% MEZCLA DE A.G =	% X	

Se debe considerar un asentamiento en cm. El procedimiento para dosificar el hormigón por el Método de la Densidad Óptima es el siguiente:

- a) Primero se debe considerar el número de cilindros a elaborar, la cantidad de agregado grueso entre (8 – 12 Kg) para cada cilindro. Mínimo dos cilindros para cada edad de ensayo.
- b) Se procede a determinar la cantidad de agregado grueso para el número total de cilindros considerados anteriormente, de la siguiente manera:

$$\text{Cantidad A. Grueso} = \# \text{ cilindros} * \text{Cantidad de A. Grueso en cada cilindro}$$

- c) Se procede a determinar la cantidad de agregado fino para el número de cilindros considerados anteriormente, de acuerdo a la proporción de los agregados en la mezcla.

$$\text{Cantidad A. Fino (kg)} = \text{Cantidad A. Grueso} * \frac{\% \text{ Mezcla de A. F.}}{\% \text{ Mezcla de A. G.}}$$

d) Calcular la densidad real de la mezcla de los agregados.

$$D_{ss} \text{ mezcla } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = (\% \text{ A. Fino} * D_{ss} \text{ AF}) + (\% \text{ A. Grueso} * D_{ss} \text{ AG})$$

e) Determinar el porcentaje óptimo de vacíos.

$$\% \text{ vacíos} = \left[1 - \frac{Densidad \text{ Óptima}}{D_{ss} \text{ mezcla}} \right] * 100$$

Si el % vacíos es mayor o igual a 25% se debe tomar el resultado, en cambio si es menor se asumen el 25%.

f) Calcular el volumen aparente de la mezcla.

$$\text{Volumen mezcla (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Cantidad (AG)} + \text{Cantidad (AF)}}{Densidad \text{ óptima mezcla}}$$

g) Se calcula el volumen de la pasta, la cual llenara los vacíos de la mezcla.

$$\text{Volumen de la pasta (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Volumen mezcla} * \% \text{ vacíos}}{100}$$

h) Determinar la relación agua/cemento de acuerdo a la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días requerida, utilizando la siguiente tabla:

Tabla 11.- Resistencia a la compresión del hormigón en función a la relación agua/cemento.

f_c (MPa)	RELACIÓN AGUA / CEMENTO
45	0,37
42	0,40
40	0,42
35	0,46
32	0,50
30	0,51
28	0,52
25	0,55
24	0,56
21	0,58
18	0,60

Fuente.- Laboratorio de Ensayo de Materiales. UCE. Quito – Ecuador

i) Calcular la densidad de la pasta.

$$Densidad\ pasta\ \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{1 + \frac{a}{c}}{\frac{1}{Densidad\ cemento} + \frac{a}{c}}$$

j) Calcular el peso de la pasta.

$$Peso\ de\ la\ pasta\ (kg) = Vol.\ pasta * Densidad\ pasta$$

k) Se calcula la cantidad inicial de agua para la mezcla.

$$Cantidad\ de\ agua\ i\ (kg) = \frac{Peso\ de\ la\ pasta * \frac{a}{c}}{1 + \frac{a}{c}}$$

- l) Se debe calcular la cantidad de cemento para la mezcla.

$$\text{Cantidad de cemento (kg)} = \frac{\text{Peso de la pasta} * 1}{1 + \frac{a}{c}}$$

Debe cumplir con: Cantidad de agua + Cantidad de cemento = Peso de la pasta

- m) Aplicar las correcciones por humedad de los agregados.

$$\text{Corrección AF} = \frac{\text{Cantidad AF} * (100 + \% \text{Humedad AF})}{100 + \% \text{Absorción AF}}$$

$$\text{Corrección AG} = \frac{\text{Cantidad AG} * (100 + \% \text{Humedad AG})}{100 + \% \text{Absorción AG}}$$

Si el contenido de humedad de algún agregado es mayor que la capacidad de absorción, el agua será restada.

Se debe comparar las cantidades de áridos corregidos con los datos iniciales, si son mayores están sobresaturados de agua caso contrario están secos.

- n) Determinar la corrección por agua.

$$\text{Corrección agua Final} = \text{Cantidad de agua } i + \text{CAF} + \text{CAG}$$

Así determinamos las cantidades necesarias de agua, cemento, agregado fino y agregado grueso para el número de cilindros propuestos anteriormente.

- o) En obra se procede a medir el asentamiento, es decir la consistencia del hormigón. Si no cumple el asentamiento propuesto, se debe realizar la corrección por relación agua – cemento.

2.4.3. Ensayos antes del fraguado.

2.4.3.1. Control del asentamiento.



Ilustración 12.- Verificando la consistencia del hormigón mediante el cono de Abrams.

El objetivo es determinar el asentamiento de hormigones de cemento hidráulico en estado plástico.

El ajuste del asentamiento de cono en obra se requiere para mantener las características de trabajabilidad del hormigón, de lo contrario se pone en riesgo la obtención de todas sus características potenciales, incluyendo la impermeabilidad y durabilidad, al no poder lograr la máxima compacidad al ser colocado y vibrado.

a) Instrumental y equipos:

- Cono de Abrams
- Varilla de compactación
- Instrumento de medida
- Cucharón

b) Procedimiento:

- Se procede a realizar el muestreo representativo de toda la amasada de hormigón para determinar el asentamiento. De acuerdo a la norma INEN 1763.
- Humedecer el molde y colocarlo sobre una superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador debe sostener firmemente el molde en su lugar durante el llenado y la limpieza del perímetro.

- Llenar el molde en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde.
- Compactar cada capa con 25 golpes utilizando la varilla de compactación. Distribuir de manera uniforme los golpes sobre la sección transversal de cada capa.
- Después de haber compactado la capa superior, enrasar la superficie del hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde.
- De inmediato retirar el molde del hormigón levantándolo cuidadosamente, luego se procede a medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro del hormigón desplazado.
- Completar todo el ensayo desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde sin interrupción dentro de un periodo de 2 ½ minutos.

c) Normas y especificaciones:

Los ensayos se realizaron de acuerdo al Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN):

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTE INEN 1578:2010	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.

2.4.3.2. Densidad, rendimiento y contenido de aire en el hormigón fresco (Método gravimétrico).



Ilustración 13.- Colocación del hormigón en el recipiente de medición y pesaje del mismo.

El objetivo es determinar la densidad del hormigón recién mezclado, el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire. El rendimiento es el volumen de hormigón producido en una mezcla, de la que se conocen las cantidades de los materiales componentes.

El método gravimétrico se aplica a hormigones con densidades que están entre 1850 kg/m³ y 2480 kg/m³.²

a) Instrumental y equipos:

- Balanza
- Varilla de compactación
- Recipiente de medición
- Placa de enrasado
- Martillo de goma
- Cucharón

b) Procedimiento:

- Se debe obtener la muestra de hormigón recién mezclado, de acuerdo con la NTE INEN 1763.
- Colocar el hormigón en el recipiente de medición utilizando el cucharón, mover alrededor del perímetro de la abertura del recipiente para asegurar una distribución uniforme del hormigón y con mínima segregación.
- Colocar el hormigón en el recipiente de medición en tres capas de aproximadamente igual volumen, compactar cada capa introduciendo 25 veces la varilla de compactación.
- Luego se procede a golpear los lados del recipiente de 10 a 15 veces con el martillo de goma, con una fuerza tal para cerrar cualquier agujero dejado por la varilla y eliminar cualquier burbuja de aire.
- Enrasar la superficie del hormigón y alisarlo utilizando la placa de enrasado, de manera que el recipiente quede lleno y nivelado.

² Este método de ensayo no se aplica para el hormigón sin plasticidad, comúnmente utilizado en la fabricación de tuberías y unidades de albañilería.

- Limpiar todo el exceso de hormigón del exterior del recipiente y determinar la masa del hormigón y recipiente.
- Calcular la densidad del hormigón, el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire aplicando las respectivas fórmulas.

c) Normas y especificaciones:

Los ensayos se realizaron de acuerdo al Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN):

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTE INEN 1579:2013	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la densidad, rendimiento y contenido de aire (Método gravimétrico)

2.4.4. Ensayos después del fraguado.

2.4.4.1. Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión.



Ilustración 14.- Colocación del espécimen en el Compresómetro para luego colocar en la maquina universal.

El módulo de elasticidad estática o secante es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo – deformación, dentro de esta zona elástica. Aplica para especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm.

a) Instrumental y equipos:

- Máquina Universal
- Deformímetros
- Compresómetro – Extensómetro
- Tornillo micrométrico

b) Procedimiento:

- La edad de la prueba podrá ser de 14 días o 28 días dependiendo del tipo de concreto o la edad que se requiera conocer el módulo de elasticidad.
- Durante el tiempo que transcurra entre el retiro de los especímenes del tanque de curado y del ensayo, debe protegerse cubriéndolos con material húmedo.
- Determinar las dimensiones del espécimen.
- Determinar los incrementos de carga a utilizar. Es recomendable tomar lecturas de deformación a cada 10 kN.
- Colocar el espécimen en una superficie horizontal, plana y firme, donde se le monte el centro de los dos anillos.
- Una vez ajustados los deformímetros, retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos, observando que los andadores de los deformímetros no registren movimientos importantes.
- Colocar el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándola adecuadamente antes de proceder a aplicar la carga.
- No debes interrumpir la carga al tomar la lectura. La velocidad de ensayo fue de 0,025 MPa/s.
- Una vez alcanzada la carga que representa el 40 % de la máxima obtenida en el ensayo a compresión, es importante detener el ensayo.
- Se debe trazar la curva de esfuerzo – deformación unitaria, luego proceder a aplicar la siguiente fórmula para determinar el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{(S2 - S1)}{e2 - 0.000050}$$

Dónde:

$E =$ Módulo de elasticidad. (kg/cm²)

$S1 =$ esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria $e1$ de 0,000050. (kg/cm²)

$S2 =$ esfuerzo correspondiente al 40% del esfuerzo máximo. (kg/cm²)

$e2 =$ deformación unitaria correspondiente al esfuerzo $S2$.

c) Normas y especificaciones:

NORMA	DESCRIPCIÓN
ASTM Designación: C 469 – 94	Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión

2.4.4.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral.

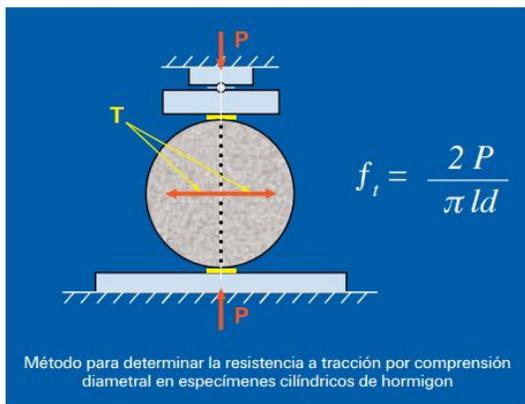


Ilustración 15.- Posición del espécimen en la máquina de ensayo para determinar la resistencia a tracción por compresión diametral. Fuente: (Concreto, 2009)

El hormigón puede soportar con total seguridad, grandes esfuerzos de compresión. Sin embargo, su resistencia para soportar esfuerzos de tracción, es mucho menor que su resistencia para soportar esfuerzos de compresión. En el hormigón armado, el acero se encarga de absorber aquellos esfuerzos de tracción que el hormigón, por sí solo, no puede soportar.

La resistencia a la tracción del concreto es una forma de comportamiento de gran interés para el diseño y control de calidad en todo tipo de obras y en especial las estructuras hidráulicas y de pavimentación.

La utilización cada vez mayor del hormigón sin armaduras, en estructuras en las que, como en el caso de los pavimentos, el hormigón debe trabajar a tracción, ha exigido el desarrollo de procedimientos de control de calidad mejor orientados hacia el verdadero comportamiento de los hormigones frente a los esfuerzos de tracción.

La resistencia a la tracción por compresión diametral es generalmente mayor que la resistencia a la tracción directa e inferior a la resistencia a la flexión (módulo de rotura).

La resistencia a la tracción por compresión diametral se utiliza en el diseño estructural de elementos de hormigón liviano, para evaluar la resistencia al corte que proporciona el hormigón y para determinar la longitud de desarrollo del refuerzo.

a) Instrumental y equipos:

- Máquina de ensayo.
- Bloque de carga o placa adicional.
- Tiras de carga.

b) Procedimiento:

- Retirar los especímenes del tanque de curado una hora antes del ensayo. Deben ensayarse en condición húmeda tan pronto como sea posible.
- Determinar las dimensiones del espécimen mediante el promedio de tres diámetros medidos cerca de los extremos y en el centro. La longitud de la muestra mediante el promedio de al menos dos longitudes.
- Colocar y centrar una de las tiras de madera a lo largo del centro del bloque de carga inferior.
- Colocar el espécimen sobre la tira y alinearlos de manera que deben estar centradas sobre la tira de madera. Colocar la segunda tira de madera a lo largo de la longitud del cilindro, centrándolo.



Ilustración 16.- Colocación del espécimen en el molde, para alineación de cilindros de hormigón y tiras de carga.

- Se procede a colocar el ensamble o la barra de carga superior. Se debe verificar que el centro del espécimen estén directamente debajo del centro de empuje del bloque de carga.
- Aplicar la carga de forma continua y sin golpes, a una velocidad constante dentro del rango de 0,7 MPa/min a 1,4 MPa/min.
- Registrar la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo al momento de la falla. Tener en cuenta el tipo de falla y la apariencia del hormigón.



Ilustración 17.- Diferencia de fractura entre el hormigón convencional y el modificado.

- Calcular la resistencia a la tracción por compresión diametral del espécimen de la siguiente manera:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * L * D}$$

Dónde:

$T =$ Resistencia a tracción por compresión diametral, MPa

$P =$ Carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, N

$L =$ Longitud promedio, mm

$D =$ diámetro promedio, mm

c) Normas y especificaciones:

NORMAS	DESCRIPCIÓN
NTE INEN 2648:2013	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.

2.4.4.3. Resistencia a la flexión del hormigón.

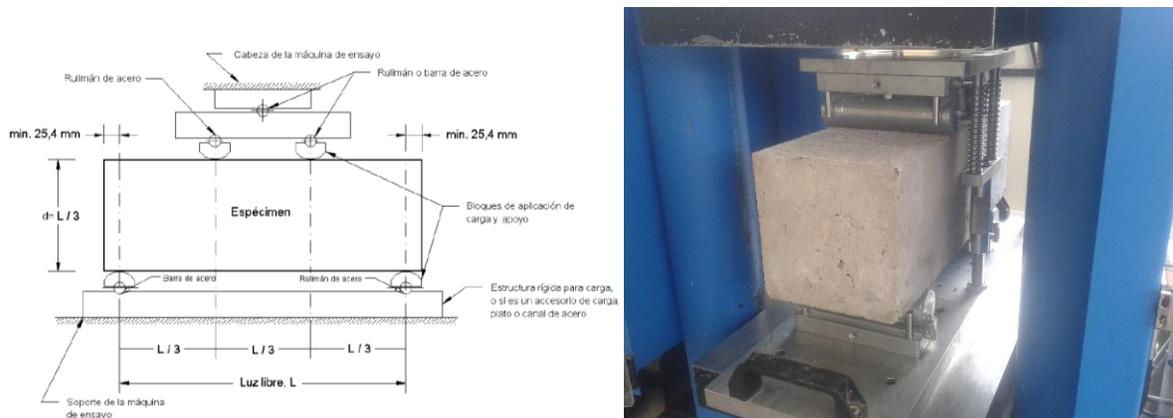


Ilustración 18.- Esquema del aparato apropiado para ensayos de flexión en el hormigón, por el método de la carga en los tercios de la luz libre. Fuente: (Concreto, 2009)

La capacidad del concreto simple a flexión se evalúa por medio del ensayo de vigas, durante este ensayo el concreto se ve sometido tanto a compresión como a tensión. La capacidad a la flexión del concreto se representa por el módulo de ruptura, el módulo de ruptura es esencial para el diseño y control de calidad de estructuras como: los pisos y pavimentos de concreto.

El método de ensayo que se utilizó para la investigación es mediante el uso de una viga simple apoyada en los extremos y cargada en los tercios de la luz libre.

a) Instrumental y equipos:

- La máquina de ensayo
- Aparatos de carga
- Flexómetro
- Regla cuadrada

b) Procedimiento:

- Los ensayos a flexión deben ser realizados tan pronto como sea posible luego de extraerlos del almacenamiento húmedo.
- Se procede a realizar la medición de las dimensiones de las vigas.
- Señalar las vigas de acuerdo al esquema de la ilustración 18, la distancia de los apoyos inferior y el apoyo superior de las cargas en el tercio de la luz libre.



Ilustración 19.- Señalar las vigas de acuerdo a la norma INEN antes del ensayo.

- Aplicar carga al espécimen continuamente y sin impacto, a una velocidad de 1,21 MPa/min, hasta que se produzca la rotura.
- Realizar las mediciones del espécimen luego del ensayo, tomar medidas a través de una de las caras fracturadas.
- Si la fractura se produce en la superficie de tracción dentro del tercio medio de la luz libre, calcular el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Dónde:

R = módulo de rotura, en MPa

P = carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, en N

L = Luz libre, en mm

b = promedio del ancho del espécimen, en la fractura, en mm

d = promedio de la altura del espécimen, en la fractura, en mm

- Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, pero no más allá del 5% de la luz libre, calcular el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = \frac{3 * P * a}{b * d^2}$$

Dónde:

a = distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más cercano medido en la superficie de la tracción de la viga, en mm

- Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, en más de un 5% de la luz libre, desechar los resultados del ensayo.

c) Normas y especificaciones:

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTE INEN 2554:2011	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación De la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los Tercios).

2.4.4.4. Determinar la densidad, absorción y porosidad en el hormigón endurecido.



Ilustración 20.- Determinando la masa inicial del espécimen para posteriormente determinar la masa saturada después de ebullición en agua.

El objetivo es determinar la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.³ Los especímenes no deben ser menor de 350 cm³ (o para concreto de peso normal, de aproximadamente 800g), y cada espécimen debe estar libre de grietas o fisuras visibles, o de bordes rotos.

a) Instrumental y equipos:

- Balanza
- Recipientes
- Horno
- Termómetro
- Tanque de agua

b) Procedimiento:

- Determinar las dimensiones de los especímenes, tales como el promedio de tres diámetros (a los extremos del cilindro y uno en el centro), y el promedio de dos alturas. Con la cual determinamos el volumen total del espécimen.⁴

³ Este método no involucra la determinación de una densidad absoluta. Por lo tanto, el espacio de poros que pueda estar presente en el espécimen y que no es vaciado durante el secado especificado o no es llenado con agua durante la inmersión y ebullición especificados, o ambas, se considera impermeable.

⁴ El Volumen total del espécimen: incluyen partes sólidas, vacíos “permeables” e “impermeables”.



Ilustración 21.- Determinando las dimensiones del espécimen utilizando un tornillo micrométrico.

- Se determina la masa inicial o masa sólida del espécimen, tan pronto como sea posible luego de extraerlo del tanque de curado.
- Secar los especímenes en el horno a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ por no menos de 24h, hasta conseguir una masa constante. Enfriar la muestra al aire, a temperatura ambiente, entre 1 hora a 3 horas. Este último valor de la masa seca al horno se designa como: A



Ilustración 22.- Retirando los especímenes del horno.

- Los especímenes se sumergen en agua a temperatura de aproximadamente 21 °C por un período no menor de 48h. Con una toalla se remueve la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados de superficie seca y se les determina su masa. El último valor obtenido de masa saturada de superficie seca después de su inmersión en agua, se designa como: B



Ilustración 23.- Removiendo con franela la humedad superficial de los especímenes.

- Los especímenes se coloca en un recipiente adecuado, cubierto con agua potable, y se hierve por un período de 5h. Luego se le deja enfriar al aire por pérdida natural de calor, por un período no menor de 14h, hasta que su temperatura final sea de 20 a 25°C. Se le remueve la humedad superficial con una toalla y se determina la masa del espécimen. La masa saturada de superficie seca después de ebullición, se designa como: C.
- Después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspenden dentro del agua por un alambre y se determina su masa sumergida aparente, que se designa como: D

c) Cálculos:

Usando los valores de las masas, determinados de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente, se procede a la ejecución de los siguientes cálculos.

- Absorción después de inmersión, %

$$ABSORCIÓN INMERSIÓN = [(B - A) * A] * 100$$

- Absorción después de inmersión y ebullición, %

$$ABSORCIÓN INMERSIÓN Y EBULLICIÓN = [(C - A) * A] * 100$$

- Densidad seca global (o bruta)

$$DENSIDAD SECA = \mathbf{g1} = \left[\frac{A}{C - D} \right] * \rho$$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión

$$DENSIDAD\ INMERSIÓN = \left[\frac{B}{C - D} \right] * \rho$$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión y ebullición

$$DENSIDAD\ INMERSIÓN\ Y\ EBULLICIÓN = \left[\frac{C}{C - D} \right] * \rho$$

- Densidad aparente

$$DENSIDAD\ APARENTE = g2 = \left[\frac{A}{A - D} \right] * \rho$$

- Volumen de vacíos (espacio de poros permeables), %

$$\% \text{ VACÍOS} = \left[\frac{g2 - g1}{g2} \right] * 100 \quad \text{O bien} \quad \% \text{ VACÍOS} = \left[\frac{C - A}{C - D} \right] * 100$$

Dónde:

A = Masa de muestra seca al horno, al aire, g

B= Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión, g

C= Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición, g

D= Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, g

g1= Densidad global (bruta) seca, Mg/m³

g2= Densidad aparente, Mg/m³

ρ= Densidad del agua = 1Mg/m³ = 1g/cm³

d) Normas y especificaciones:

NORMA	DESCRIPCIÓN
ASTM C642-13	Método de ensayo. Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido.

2.4.4.5. *Elaboración y curado de probetas para determinar la adherencia entre hormigón – refuerzo.*



Ilustración 24.- Limpiando los moldes para proceder a fundir las probetas cúbicas.

Establecer los procedimientos para elaborar y curar probetas para el ensayo de adherencia. El hormigón utilizado para moldear los especímenes debe ser muestreado, después de que se hayan realizado todos los ajustes a la dosificación de la mezcla, incluyendo la adición de agua de mezcla y los aditivos. Debido a la baja resistencia del hormigón para soportar esfuerzos de tracción, se colocan en su interior barras de acero, el material así obtenido se denomina hormigón armado. Desde el punto de vista de la resistencia lo que hace posible que el hormigón y el acero se comporten como un sólido único, es la adherencia. La probeta es cúbica de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, de aristas tales que la barra de acero la atraviesa por su centro.

a) Instrumental y equipos:

- Moldes
- Varilla de compactación
- Mazo
- Cucharón
- Llana o una paleta
- Tanque de curado

b) Procedimiento:

- Realizar el muestreo del hormigón fresco para la obtención de muestras representativas, el tiempo transcurrido entre la obtención de la primera y la última porción de la muestra no debe exceder de 15 minutos.

- Moldear los especímenes sobre una superficie rígida y nivelada, libre de vibraciones y otras perturbaciones, en un lugar tan cercano como sea posible al lugar donde van a ser almacenados.
- Colocar la varilla corrugada de forma perpendicular y en el centro de la base del molde. La varilla también debe contener un pedazo de tubo plástico la cual cumplirá con la función de evitar la adherencia concreto-acero en una parte del molde (Altura del molde-5 \varnothing). El tubo plástico debe ser de un diámetro mayor en referencia a la varilla corrugada.
- Colocar el hormigón en el molde, en dos capas de aproximadamente igual volumen. Compactar cada capa uniformemente sobre la sección transversal con la punta redondeada de la varilla, con un total de 10 golpes. Luego de que cada capa ha sido compactada, golpear en el exterior del molde de 5 a 7 veces con el mazo.
- Realizar todo el terminado con la mínima manipulación necesaria para producir una superficie plana, que esté nivelada con el borde superior del molde y que no tenga depresiones.
- Mover los especímenes al lugar del curado inicial para su almacenamiento. La superficie sobre la que se almacenarán los especímenes debe estar nivelada.
- **Curado inicial.-** Inmediatamente después del moldeo y terminado, el espécimen debe ser almacenado por un período de hasta 48 horas a una temperatura entre 16 °C y 27 °C, en un ambiente que prevenga la pérdida de humedad de los especímenes. Proteger todos los especímenes de los rayos directos del sol y de cualquier radiación calórica.



Ilustración 25.- Curado inicial de las probetas cúbicas de hormigón.

- **Curado final.**- Una vez concluido el curado inicial y dentro de 30 minutos después de remover los especímenes de los moldes, curarlos a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniendo todo el tiempo sus superficies con agua libre, utilizando tanques de almacenamiento.



Ilustración 26.- Los especímenes ubicados en el tanque de curado.

2.4.4.6. *Ensayo para determinar la adherencia entre hormigón – acero sometidos a cargas.*

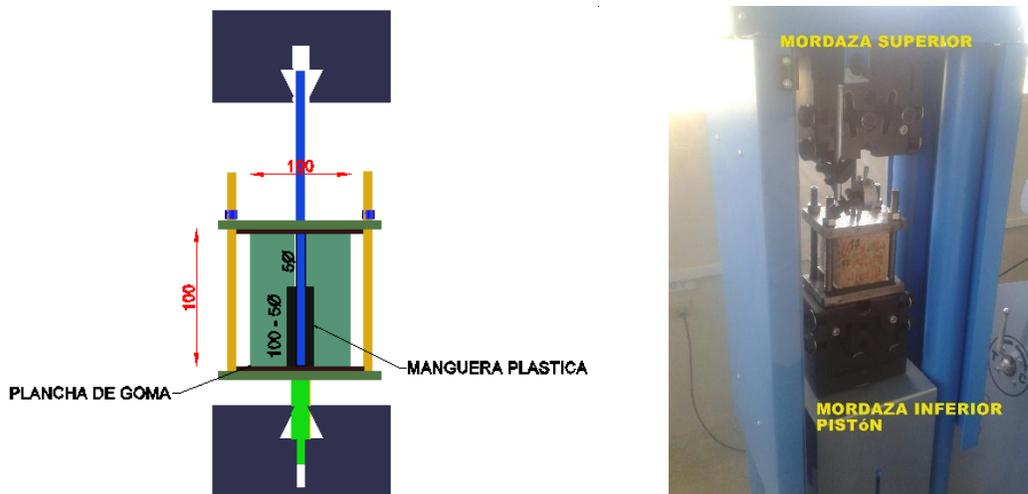


Ilustración 27.- Esquema del ensayo para determinar la adherencia hormigón - acero.

La adherencia hormigón-acero es el fenómeno básico sobre el que descansa el funcionamiento del hormigón armado como material estructural. Si no existiese adherencia, las barras serían incapaces de tomar el menor esfuerzo de tracción, ya que el acero deslizaría sin encontrar resistencia en toda su longitud y no acompañaría al hormigón en sus deformaciones.

El ensayo de interés para este trabajo es el propuesto por el comité conjunto RILEM/CEB/FIP, el cual considera una probeta cubica con una única barra de acero (\varnothing 10 mm) centrada. La longitud de adherencia es de $l_d = 5 \varnothing$. El tamaño y la forma del cuerpo de prueba son proporcionales al diámetro de la barra de acero y a la longitud de adherencia (l_d). La manguera plástica se colocó a una altura de $(100-5\varnothing)$, con la finalidad de evitar adherencia entre hormigón-acero en una parte de la probeta.

En la Ilustración 6 se presenta el montaje de la máquina universal de ensayos mecánicos, servo-hidráulica, la instrumentación para los ensayos de adherencia. Un deformímetro de 10 mm presos a la placa superior. El cuerpo de prueba está confinado entre dos placas de acero garantizando el desplazamiento de la barra.

El modelo fue adoptado para facilitar la operación durante la fundida del hormigón y posicionamiento en la máquina de ensayo. De esta forma se facilitaron los procedimientos para medir los desplazamientos entre la barra de acero y el hormigón.

a) Instrumental y equipos:

- Máquina universal
- Molde adoptado para el ensayo
- Deformímetro
- Calibrador pie de rey digital

b) Procedimiento:

- Luego de extraer los especímenes del almacenamiento húmedo, se debe señalar la longitud restante de la varilla total, embebida en la probeta.



Ilustración 28.- Placa base colocado en el pistón.

- Colocar la probeta en el molde adoptado para el ensayo, la cual debe estar adherida a la mordaza inferior o pistón.
- Aplicar carga de compresión mediante la opción del posicionamiento manual de la maquina universal. Hasta que la varilla ingrese en la mordaza superior.
- Ajustar las tuercas del molde adoptado para el ensayo de adherencia. La varilla debe estar lo más perpendicular posible con referencia a las mordazas.
- Colocar el deformímetro para verificar el desplazamiento del molde.



Ilustración 29.- Forma de colocación del deformímetro.

- Aplicar carga de tracción al espécimen continuamente y sin impacto. La velocidad de carga aplicada a las probetas de adherencia fue de 1 mm/min.
- El ensayo se debe realizar entre dos personas, la primera persona debe grabar el desplazamiento del deformímetro, mientras la segunda debe indicar la carga aplicada a cada kN.
- Aplicar la carga de tracción hasta que el indicador de carga muestre que está decreciendo.
- Luego se debe retirar las tuercas y la placa superior del molde. Posteriormente para proceder a retirar la probeta.
- Se debe realizar la medición de la longitud desplazada.



Ilustración 30.- Medición de la longitud desplazada con el calibrador pie de rey digital.

2.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Para el análisis del proyecto de investigación se procedió a realizar los ensayos y evaluar las propiedades de los materiales empleados en la dosificación (agregados, polímero elástico). Se escogió el polímero elástico adecuado para la investigación de acuerdo a ensayos de laboratorio después del fraguado.

Con los datos de los materiales empleados, se procedió a realizar el diseño del hormigón convencional y modificado, de acuerdo al método por densidad óptima. En el hormigón modificado se realizó diferentes proporciones de adición de polímero elástico (2, 5, 7 y 10 %).

Se realizaron ensayos antes del fraguado del hormigón. Tales como: asentamiento, densidad, rendimiento, contenido de aire. Y después del fraguado: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tracción por compresión diametral, resistencia a la flexión, densidad, absorción, porosidad, y adherencia entre hormigón-refuerzo. Después de analizar los resultados de cada porcentaje de proporción, se identificó el porcentaje óptimo de adición de polímero elástico.

Con el porcentaje óptimo, se procedió a realizar el diseño del hormigón definitivo, para lo cual se debió restar la cantidad de adición del polímero elástico óptimo al agregado grueso. Posteriormente se procedió a realizar los ensayos antes y después del fraguado del hormigón.

Para los ensayos correspondientes se realizaron un número determinado de probetas para la dosificación a ser analizada, cumpliendo de esta manera con las normas básicas para obtener valores representativos estadísticamente.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

3.1. ENSAYOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales utilizados para la elaboración del hormigón modificado han sido: árido fino (arena triturada), árido grueso (ripió triturado), fibras de polímeros elásticos, cemento, agua. A continuación se describen más detalladamente las características físicas de cada material detallando su origen, densidad, absorción y fracción granulométrica.

3.1.1. Propiedades de los áridos (Fino y Grueso).

Los áridos forman prácticamente el 75% del hormigón y son capaces de disminuir el coste por unidad de volumen, así como aumentar la resistencia y disminuir las retracciones del hormigón.

Los áridos utilizados en este estudio son procedentes de la cantera Cerro Negro (Castro Hnos.), y han sido clasificados según el tamaño de las partículas que lo componen.

3.1.1.1. Árido Fino.

Se utilizó arena que pasa el tamiz #08 con las siguientes características:



Ilustración 31.- Arena triturada después del tamizado.

Análisis granulométrico (Norma NTE INEN 0696:2011)

- Tamaño máximo: 9,53 mm
- Tamaño máximo nominal: 4,75 mm

Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción (NTE INEN 0856:2010)

- Densidad Aparente: 2,56 g/cm³.
- Gravedad específica con SSS: 2,40 g/cm³.
- Peso unitario suelto: 1,54 g/cm³.
- Absorción: 4,57 %
- Módulo de finura: 3,59

En el Anexo 9 se encuentra el cálculo de la densidad, densidad relativa y absorción del árido fino.

3.1.1.2. Agregado grueso.

Se utilizó ripio triturado que pasa el tamiz de 1'' con las siguientes características:



Ilustración 32.- Ripio triturado después del tamizado.

Análisis granulométrico (Norma NTE INEN 0696:2011)

- Tamaño máximo: 25,00 mm
- Tamaño máximo nominal: 12,50 mm

Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción (NTE INEN 0857:2010)

- Densidad Aparente: 2,56 g/cm³.
- Gravedad específica con SSS: 2,45 g/cm³.
- Peso unitario suelto: 1,54 g/cm³.
- Absorción: 2,24 %

En el Anexo 10 se encuentra el cálculo de la densidad, densidad relativa y absorción del árido grueso.

3.1.2. Propiedades del polímero elástico reciclado.

Caucho granulado de forma irregular del tipo SBR⁵. Proviene de los neumáticos en desuso, fue suministrado por la empresa FACERQUIM ubicada en la ciudad de Ambato.



Polímero elástico # 2



Polímero elástico # 3



Polímero elástico # 4



Polímero elástico # 5



Ilustración 33.- Polímero elástico # 6 suministrado por FACERQUIM.

⁵ El caucho sintético fue usado para disminuir el consumo de las fuentes naturales de caucho, especialmente en el área de la fabricación de neumáticos, que en ese momento aún consistían de caucho sólido.

Luego de realizar un análisis de los diferentes tipos de fibras, se procedió a escoger la fibra de polímero elástico óptimo. Para el presente estudio se utilizó las fibras # 6 de la ilustración 33.

- Dimensiones:
 - Longitud aproximada = 0,3 a 2,5 cm
 - Diámetro aproximado = 1 a 2 mm
- Contenido de humedad: 1,80 %
- Capacidad de absorción: 2,01 %

En el Anexo 4 y 8 se encuentra el cálculo del contenido de humedad y la capacidad de absorción respectivamente.

3.1.3. Propiedades del cemento.

El cemento es un conglomerante hidráulico formado por materiales que reaccionan con el agua proporcionando un producto sólido resistente y estable. En este estudio se ha utilizado un cemento portland Tipo IP CHIMBORAZO.



Ilustración 34.- Cemento Chimborazo tipo IP.

- Peso unitario suelto: 1,06 g/cm³.
- Densidad: 2,80 g/cm³.
- Cemento portland. Requisitos: NTE INEN 0152:2012
- Cemento hidráulico. Determinación de la densidad: NTE INEN 0156:09

3.2. MÉTODO DE DISEÑO

Para el desarrollo de la investigación se aplicó el *método de densidad óptima*, planteamos una dosificación inicial para el hormigón convencional y para cada adición de diferentes proporciones de polímero elástico (2, 5, 7, 10%).

Para obtener la mezcla inicial se debió comprobar el asentamiento en cono de Abrams, la cual se usa como medida de la consistencia y de la humedad del hormigón. El modelo del hormigón convencional y modificado fue fundido después de la verificación de la propiedad de fluidez.

La dosificación de mezclas con 2, 5, 7 y 10% de adición de polímero elástico reciclado proveniente de llantas en desuso, se lo realizó parcialmente con respecto a la cantidad del agregado fino. Teniendo en cuenta las correspondientes correcciones que se hicieron por contenido de humedad, absorción y asentamiento.

Se utilizó una relación agua/cemento (a/c) igual a 0.525, la cual equivale a una resistencia a la compresión de 28 MPa (280 kg/cm²) aproximadamente, los componentes del hormigón se dosificaron en peso.

Luego de realizar los diferentes ensayos se determinó las propiedades del hormigón convencional y del hormigón con las diferentes proporciones de polímero elástico. Se procedió a escoger el porcentaje óptimo de polímero elástico, para definitivamente plantear una dosificación final del hormigón modificado.

Para la dosificación final, el agregado grueso fue sustituido parcialmente por el polímero elástico con referencia a la cantidad óptima escogida (2%). Se planteó la dosificación final para el hormigón convencional y hormigón modificado para proceder a comparar sus propiedades.

En el Anexo 11 y 12, se puede observar el procedimiento del diseño inicial y final sucesivamente de las mezclas, con sus respectivos cálculos.

En las siguientes tablas se muestra las dosificaciones obtenidas con el método de la densidad óptima, tanto inicial como final con las diferentes proporciones de polímero elástico.

DOSIFICACIÓN INICIAL POR PESO PARA UNIDAD DE CEMENTO

MÉTODO DE LA DENSIDAD ÓPTIMA

TIPO DE CEMENTO : PUZOLÁNICO TIPO IP (CHIMBORAZO)
 AGREGADO GRUESO: CERRO NEGRO
 AGREGADO FINO: CERRO NEGRO

	MATERIAL						OBSERVACIÓN
	P.ELÁSTICO	AGUA	CEMENTO	A.FINO	A.GRUESO	P. ELÁSTICO	
	%	kg	kg	kg	kg	kg	
HORMIGÓN CONVENCIONAL	0%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,00	
PROPORCIONES DE ADICIÓN EN EL H. MODIFICADO	2%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,04	Adición con respecto al A. Fino
	5%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,09	Adición con respecto al A. Fino
	7%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,12	Adición con respecto al A. Fino
	10%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,18	Adición con respecto al A. Fino

Cantidad de cemento para cada mezcla = 15 kg

	MATERIAL						OBSERVACIÓN
	P.ELÁSTICO	AGUA	CEMENTO	A.FINO	A.GRUESO	P. ELÁSTICO	
	%	kg	kg	kg	kg	kg	
HORMIGÓN CONVENCIONAL	0%	8,13	15,00	26,69	34,17	0,00	
PROPORCIONES DE ADICIÓN EN EL H. MODIFICADO	2%	8,13	15,00	26,69	34,17	0,53	Adición con respecto al A. Fino
	5%	8,13	15,00	26,69	34,17	1,33	Adición con respecto al A. Fino
	7%	8,13	15,00	26,69	34,17	1,87	Adición con respecto al A. Fino
	10%	8,13	15,00	26,69	34,17	2,67	Adición con respecto al A. Fino

Tabla 12.- Dosificación final empleando el método de la densidad óptima.

MÉTODO DE LA DENSIDAD ÓPTIMA

TIPO DE CEMENTO : PUZOLÁNICO TIPO IP (CHIMBORAZO)
 AGREGADO GRUESO: CERRO NEGRO
 AGREGADO FINO: CERRO NEGRO

	MATERIAL						OBSERVACIÓN
	P.ELÁSTICO	AGUA	CEMENTO	A.FINO	A.GRUESO	P. ELÁSTICO	
	%	kg	kg	kg	kg	kg	
HORMIGÓN CONVENCIONAL	0%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,00	
HORMIGÓN MODIFICADO CON PORCENTAJE ÓPTIMO	2%	0,54	1,00	1,78	2,28	0,05	Sustitución con respecto al A. Grueso

Cantidad de cemento para cada mezcla = 15 kg

	MATERIAL						OBSERVACIÓN
	P.ELÁSTICO	AGUA	CEMENTO	A.FINO	A.GRUESO	P. ELÁSTICO	
	%	kg	kg	kg	kg	kg	
HORMIGÓN CONVENCIONAL	0%	8,12	15,00	26,73	34,20	0,00	
HORMIGÓN MODIFICADO CON PORCENTAJE ÓPTIMO	2%	8,12	15,00	26,73	33,52	0,68	Sustitución parte del A. Grueso

3.3. ENSAYOS ANTES DEL FRAGUADO

Con la dosificación inicial se elaboraron mezclas de hormigón convencional y de hormigón modificado con adición fibras de polímero elástico (2, 5, 7, 10%) en peso. En donde la relación agua/cemento se mantuvo constante en 0.525, y se adicionó el polímero con respecto al agregado fino, el contenido de ripio permanece constante.

Las mezclas se elaboraron considerando un asentamiento de 10 cm. Para cada mezcla se realizaron ensayos de asentamiento según norma (NTE INEN 1578:2010); estos resultados son mostrados en la tabla 13, en donde el menor y mayor asentamiento se presentó en la mezcla correspondiente al 10% de polímero elástico y Hormigón convencional respectivamente. Ver el anexo 13 densidad, rendimiento y contenido de aire en el hormigón.

Los resultados del ensayo de asentamiento se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13.- Datos de medición del asentamiento con la dosificación inicial de las mezclas.

DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO				
NTE INEN 1578:2010				
MEZCLA	ASENTAMIENTO	ASENTAMIENTO PROMEDIO	LÍMITES	ASPECTO
	cm	cm	cm	
Hormigón Normal	10,00	10,50	15,00	Levemente fluido
Hormigón Normal	11,00		10,00	
H. con 2% polímero	8,00	7,75	9,50	Levemente cohesivo
H. con 2% polímero	7,50		5,00	
H. con 5% polímero	6,00	5,75	9,50	Levemente cohesivo
H. con 5% polímero	5,50		5,00	
H. con 7% polímero	4,00	4,30	4,50	Suelto y sin cohesión
H. con 7% polímero	4,60		1,00	
H. con 10% polímero	3,50	3,35	4,50	Suelto y sin cohesión
H. con 10% polímero	3,20		1,00	

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Una vez verificado el asentamiento, se procedió a realizar los ensayos para determinar la densidad, rendimiento y contenido de aire en el hormigón fresco mediante el Método gravimétrico.

Tabla 14.- Datos de la densidad, rendimiento y contenido de aire con la dosificación inicial.

DENSIDAD, RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE EN EL HORMIGÓN FRESCO (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)

NTE INEN1579:2013					
DESCRIPCIÓN	DENSIDAD	DENSIDAD PROMEDIO	RENDIMIENTO	CONTENIDO DE AIRE	CONTENIDO AIRE PROM.
	kg/m3	kg/m3	m3	%	%
Hormigón Normal	2245	2245	0,037	2,17	2,17
Hormigón Normal	2245		0,037	2,17	
H. con 2% polímero	2231	2227	0,038	1,88	2,04
H. con 2% polímero	2224		0,038	2,19	
H. con 5% polímero	2203	2205	0,039	1,81	1,74
H. con 5% polímero	2206		0,039	1,66	
H. con 7% polímero	2193	2191	0,039	1,44	1,52
H. con 7% polímero	2189		0,039	1,60	
H. con 10% polímero	2165	2167	0,040	1,46	1,38
H. con 10% polímero	2168		0,040	1,30	

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Una vez realizados los ensayos antes del fraguado, se procedió a conformar cada una de los especímenes requeridos para efectuar los ensayos de laboratorio respectivos, utilizando la nomenclatura mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 15.- Nomenclatura de los especímenes.

MEZCLA	% DE POLIMERO ELASTICO
Hormigón convencional	H.N.0%
Hormigón adición 2% polímero respecto A. Fino	H.M+2%F
Hormigón adición 5% polímero respecto A. Fino	H.M+5%F
Hormigón adición 7% polímero respecto A. Fino	H.M+7%F
Hormigón adición 10% polímero respecto A. Fino	H.M+10%F
Hormigón sustitución 2% del A. Grueso (óptimo)	H.M-2%G

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

3.4. ENSAYOS DESPUES DEL FRAGUADO.

En este capítulo detallaremos los resultados de los ensayos realizados, como son: el ensayo de compresión de los cilindros con su respectivo diagrama (Resistencia a la compresión vs Edad), ensayo a la flexión del hormigón en vigas (Módulo de Rotura del Hormigón), ensayo de

Resistencia a la tracción por compresión diametral, Modulo de elasticidad estático con su diagrama (Esfuerzo vs Deformación), ensayo de adherencia del hormigón con el acero de refuerzo y el ensayo de la Determinación de Densidad, Absorción y porosidad; resultados de ensayos del hormigón Endurecido.

Resumido tenemos los siguientes resultados de ensayos:

Tabla 16.- Ensayos para determinar las Propiedades del Hormigón Patrón y Modificado

ENSAYOS

Resistencia a la compresión
Módulo de elasticidad
Resistencia a la tracción por compresión diametral
Resistencia a la flexión
Adherencia con refuerzo

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Las propiedades más relevantes que determinan el comportamiento de un hormigón, son las que se evaluarán en el presente estudio. Para el cumplimiento del plan de estudios se proyectó dos etapas de elaboración, proceso de curado y ensayos para determinar las Propiedades establecidas.

Contemplando en la primera etapa la determinación de las Propiedades, tanto del Hormigón Patrón como del Modificado, añadiendo el porcentaje de Caucho en relación al peso del Agregado Fino.

Segunda Etapa, conocido los datos de la primera etapa, se efectúan las probetas finales, tanto del Hormigón Patrón como del Modificado hasta una dosificación óptima, en primera instancia se añade el porcentaje de Caucho en relación al peso del Agregado Fino para comprobación de resultados de la primera etapa y, como segunda parte se sustituye el porcentaje de Caucho en relación al peso del Agregado Grueso.

En ambas etapas se elaboran los ensayos del Hormigón Patrón y Modificado para que no exista variaciones en los resultados, con una similitud en peso, volumen, y elaboración de especímenes en días correlativos.

3.4.1. Ensayo a Compresión.

Dentro del estudio del Hormigón, se tiene la determinación de las propiedades del hormigón endurecido, entre las cuales, la propiedad más importante es la capacidad de absorber esfuerzos de compresión, esta capacidad se evalúa mediante ensayos de compresión sobre probetas estándar, para el caso de nuestra investigación.

Estas probetas estándar se la fábrica utilizando moldes metálicos de forma cilíndrica, en donde se verterá el hormigón fresco para obtener un cilindro de la misma forma del molde, cuyas dimensiones cumplirán con la relación 2:1, entre la Altura de la probeta y el Diámetro del mismo, teniéndose la siguiente:

Probeta: 10 cm. de diámetro y 20 cm. de altura

El uso de estas probetas esta tanto para los cilindros del Hormigón Convencional y Hormigón Modificado con sus distintos porcentajes de adición de Polímero Elástico (Neumático); en función del granulado grueso que se utilizó en la fabricación del hormigón, es así que para un tamaño nominal máximo de granulado mayor o igual a 1 pulgada, se usara las probetas de 10 x 20 cm.

Desarrollo del ensayo según norma INEN 1573:2010 “Método Estándar de Prueba de Resistencia a la Compresión de Probetas Cilíndricas de Hormigón”.



Ilustración 35.- Moldes Cilíndricos para probetas de Hormigón de 10 x 20 cm.

Podemos obtener dos tipos de resultados de este ensayo, que lo describimos a continuación:

- a. Resistencia a la compresión. - Esta se calcula dividiendo la carga máxima de Falla obtenida en el ensayo para el área de la sección transversal del cilindro.

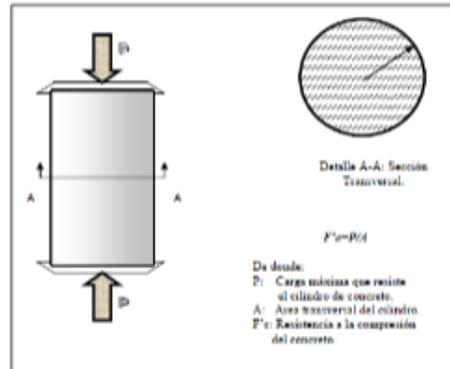


Ilustración 36.- Ensayo de Compresión de un cilindro de Hormigón

- b. Tipo de falla y apariencia del Hormigón. - El cilindro de hormigón es llevado hasta la rotura, en la cual observamos la dirección de las líneas de falla para predecir los tipos de esfuerzos que han actuado en el proceso de carga. Con ello podemos definir ciertos criterios que nos servirán para mejorar la dosificación, como, por ejemplo; si en el plano de falla se ve que el ripio no se fractura, podíamos decir que no hubo la suficiente adherencia entre la pasta de cemento y el agregado grueso. (Normalización, 2010)

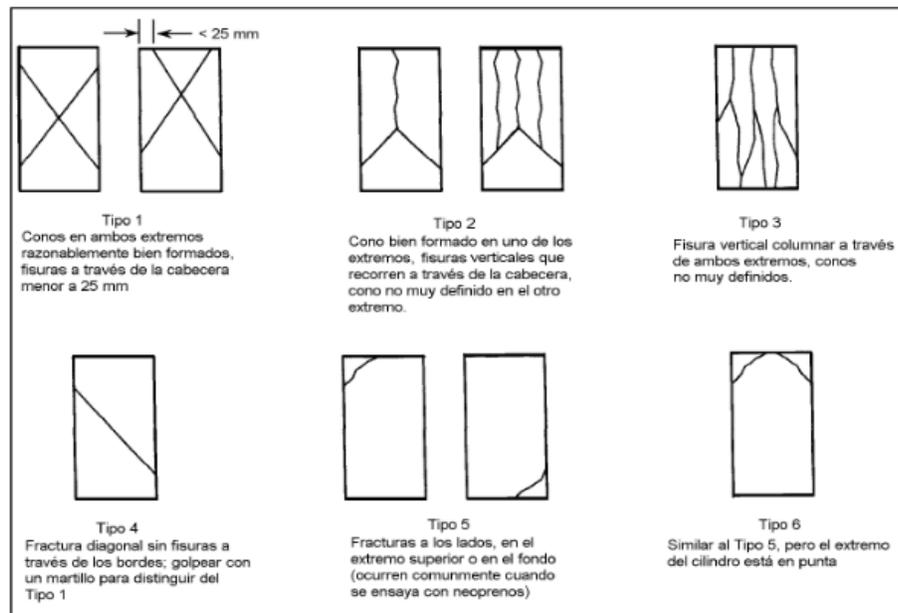


Ilustración 37.- Esquema de los moldes típicos de fractura.

3.4.1.1. Determinación del número total de probetas en la investigación

Para determinar el número de probetas de hormigón que se ensayarán para cada una de las diferentes condiciones, se tendrá en cuenta el criterio de que el número mínimo de valores para representar confiablemente resultados estadísticos aceptables, es de 10 pero como no contamos con tantos cilindros para realizar todas las condiciones en los periodos establecidos, decidimos realizar 6 probetas para cada condición en las edades de 3, 7, 28 días haciendo un total de 90 probetas de 10 x 20 cm.

Tabla 17.- Total Probetas hormigón Convencional

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)			Total Probetas
		3	7	28	
Resistencia a la compresión	INEN 1573	6	6	6	18

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Tabla 18.- Total probetas hormigón Modificado

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón(Días)												Total Probetas
		3				7				28				
		Adición Polímero (%)												
		2	5	7	10	2	5	7	10	2	5	7	10	
Resistencia a la compresión	INEN 1573	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	72

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Se efectúan 90 probetas, seis de cada condición y edades, las cuales servirán para realizar ensayos de compresión hasta la rotura, con el objeto de verificar la resistencia para la cual ha sido diseñado el hormigón. En edades de 3, 7, 28 días, tanto del Hormigón Patrón y Modificado correspondientes a la primera etapa de la investigación, con el objetivo de evaluar el desarrollo de un concreto convencional en comparación al Modificado, además de ir registrando detalles de mediciones de los cilindros, Cargas, Tipo de Fracturas y Curvas de Resistencias que se encuentran tabulados en los Anexos.

3.4.1.2. Resultados Primera Etapa

a) Resumen General Grafico Esfuerzo Vs Tiempo

El análisis grafico Esfuerzo vs. Tiempo, tanto del hormigón convencional y modificado ayudan a apreciar cuál es el de mejor comportamiento, y así da mayor resistencia que es el objetivo de la investigación.

Precedente al ensayo de cada probeta se tomó datos de cada una como la altura promedio de cada cilindro, diámetro promedio de cada cilindro y carga máxima de compresión a la rotura, todos estos parámetros permiten posteriormente calcular el área de cada cilindro y la resistencia máxima del ensayo.

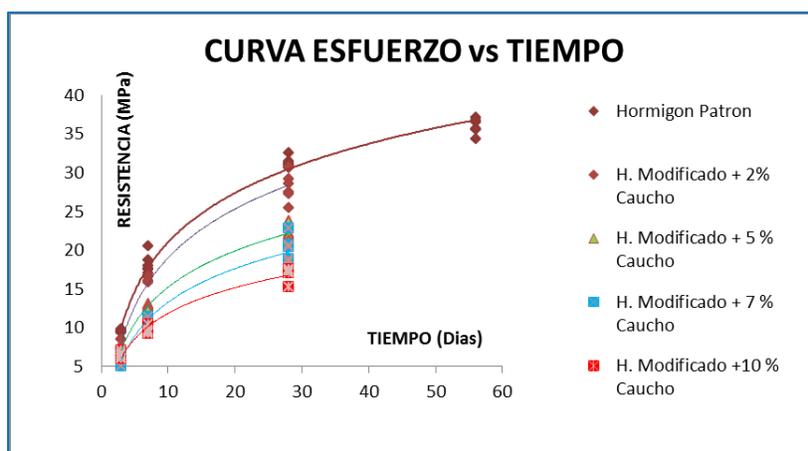


Ilustración 38.- Curva Esfuerzo vs Tiempo del hormigón Patrón y Modificado

El hormigón Convencional da como resultado una resistencia notablemente mayor que las que emplean caucho añadido a la mezcla. La diferencia entre las mezclas describe curvas similares entre sí, pero menores los de adición de Caucho en los distintos Porcentajes.

Tabla 19.- Resumen de resistencias Alcanzadas hormigón Convencional y Modificado (Adición)

EDAD	Hormigón convencional	Hormigón Modificado			
	MPa	2%	5%	7%	10%
3	9,53	7,66	7,21	5,88	6,45
7	18,22	16,45	12,63	11,80	9,62
28	31,30	28,11	22,24	19,81	16,96

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

En general los especímenes dosificados de Hormigón Convencional dieron Resistencias superiores que los realizados empleando porcentajes de polímero elástico (2, 5, 7, 10), pero al considerar que la meta planteada en la investigación es obtener un Hormigón Modificado que alcance la Resistencia de $f'c = 28$ MPa, se está cumpliendo en el porcentaje del 2 % al añadir el caucho respecto al peso del agregado fino de la dosificación final ya que avanzo tal proposición.

b) Control de Datos Individuales Laboratorio

La toma de datos del laboratorio se realiza como se muestra en la figura, aquí se presenta los datos individuales, grafica Esfuerzo vs Tiempo del Hormigón Convencional con todas las características de los cilindros ensayos.

Tabla 20.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión

Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Cilindros N°	Diámetro Promedio (mm)	Longitud Promedio (mm)	Sección transversal (mm ²)	Carga máxima (kN)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Tipo de fractura	Promedio Esfuerzo Compresión (MPa)
HORMIGON CONVENCIONAL									
31/08/2015	03/09/2015	N1	101,63	204,81	8112,64	77,337	9,533	2	9,526
		N2	100,39	204,73	7915,89	77,620	9,806	4	
		N3	102,36	204,55	8229,60	76,912	9,346	2	
		N4	101,85	204,19	8147,27	77,452	9,507	2	
		N5	102,25	204,00	8211,39	77,249	9,408	4	
		N6	101,28	204,18	8056,86	76,985	9,555	4	
26/08/2015	02/09/2015	N7	101,89	204,22	8154,20	138,669	17,006	5	18,220
		N9	100,71	204,20	7966,43	163,314	20,500	5	
		N8	100,69	203,75	7962,74	140,368	17,628	1	
		N10	100,85	203,40	7987,54	139,638	17,482	5	
		N11	100,65	203,63	7956,42	148,828	18,705	5	
		N12	101,58	203,25	8104,13	145,852	17,997	4	
26/08/2015	23/09/2015	N3	100,96	204,00	8005,50	260,216	32,505	2	31,303
		N12	101,51	202,75	8092,96	252,524	31,203	2	
		N6	101,27	203,50	8054,21	249,523	30,980	2	
		N7	101,45	203,25	8083,40	250,982	31,049	3	
		N8	100,80	203,50	7980,15	251,362	31,498	2	
		N9	101,97	203,25	8165,94	249,723	30,581	2	

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo 14 hasta el Anexo 18.

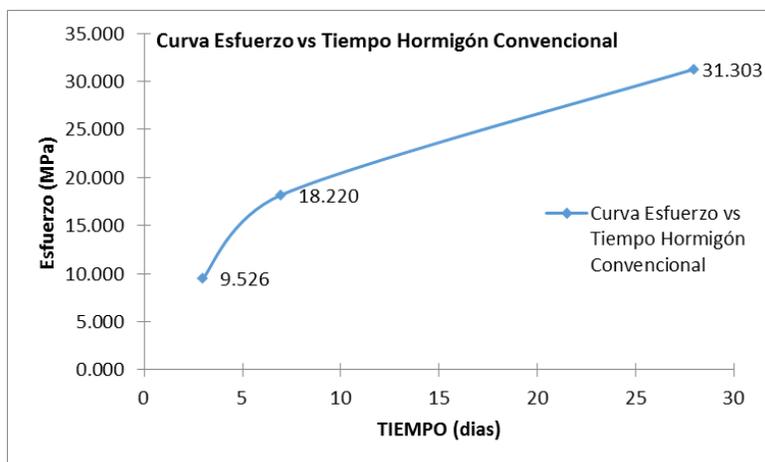


Ilustración 39.- Curva Esfuerzo vs Tiempo.

3.4.1.3. Resultados Segunda Etapa.

Los resultados de la segunda etapa comprenden la dosificación óptima del Hormigón Modificado y los resultados de una mezcla adicional que es la sustitución, con la idea de obtener más resultados que corroboren a la decisión final de la presente Investigación.

a) Resultados Esfuerzo

En los presente gráficos se presenta los resultados de la segunda etapa del proyecto de investigación; no es posible la realización de un gráfico comparativo de esfuerzo vs edad de los especímenes pues que en esta fase solo se elaboraron a la edad de 28 días.

Tabla 21.- Resumen de resistencias Alcanzadas hormigón Convencional y Modificado (Adición y sustitución)

EDAD	Hormigón Convencional MPa	Hormigón Modificado	
		H.M.+2%F MPa	H.M.-2%G MPa
28	30,10	28,04	25,20

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

El hormigón Convencional da como resultado una resistencia notablemente mayor que las que emplean caucho añadido a la mezcla. Pero también es notable que el hormigón modificado Añadido el Polímero Elástico en porcentaje del 2% al peso del agregado fino es mayor que la sustitución del Polímero por lo tanto es uno de los resultados relativos del diseño óptimo al cual se quiere llegar en la presente investigación.

b) Control de Datos Individuales Laboratorio

La toma de datos del laboratorio se realiza como se muestra en la figura, aquí se presenta los datos de los ensayos del Hormigón Convencional y el hormigón sustituido.

Tabla 22.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión

Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Cilindros N°	Diámetro Promedio (mm)	Longitud Promedio (mm)	Sección transversal (mm ²)	Carga máxima (kN)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Tipo de fractura	Promedio Esfuerzo Compresión (MPa)			
HORMIGON CONVENCIONAL												
10/12/2015	07/01/2016	N1	101,36	203,50	8069,59	233,107	28,887	2	30,098			
		N2	101,77	203,50	8133,94	214,534	26,375	2				
		N5	101,63	203,50	8112,11	293,802	36,218	4				
		N6	101,34	203,50	8066,41	188,857	23,413	3				
		N7	101,69	202,50	8121,16	282,341	34,766	2				
		N8	101,26	202,50	8053,68	265,321	32,944	4				
		N9	101,63	203,50	8112,11	256,321	31,597	4				
		N10	101,77	203,50	8133,94	216,213	26,582	2				
		HORMIGON MODIFICADO SUSTITUIDO 2 % Caucho al Agregado Grueso										
		11/12/2015	08/01/2016	1%2	101,62	203,00	8109,98	128,045		15,789	3	25,198
2%2	102,48			203,50	8247,83	197,639	23,963	3				
3%2	102,40			202,25	8234,96	222,227	26,986	3				
4%2	102,02			202,50	8174,49	227,246	27,799	3				
5%2	101,61			203,00	8109,45	216,082	26,646	3				
6%2	102,27			202,75	8215,13	207,968	25,315	3				
7%2	102,27			202,00	8214,60	194,759	23,709	3				
8%2	102,40			202,25	8234,96	224,756	27,293	3				
9%2	102,02			202,50	8174,49	226,321	27,686	3				
10%2	101,61			203,00	8109,45	217,321	26,798	3				

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo 19.

3.4.2. Módulo de elasticidad estático del concreto por compresión de cilindros.

Los ensayos se realizaron sobre cilindros de diámetro 15 cm y altura de 30 cm. Con curado normalizado y de 28 días de edad. Para que los resultados sean representativos en la primera etapa, se ensayaron 3 probetas por cada dosis de polímero elástico (2, 5, 7, 10%) y 3 probetas para el hormigón convencional. Con un total de 15 probetas ensayadas.

Las mediciones de deformación se realizaron con un deformímetro con un dial micrométrico. La relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del intervalo elástico de una curva esfuerzo deformación unitaria para el hormigón define al módulo de elasticidad (E_c) del hormigón.

Según lo especificado en la norma ASTM C-469-94, se obtiene el Módulo Estático de Elasticidad del Hormigón de cada probeta y se la compara con la ecuación propuesta por el A.C.I., esta ecuación está en función de la resistencia.

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa}$$

$$\text{Para } 21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}$$

3.4.2.1. Resultados Primera Etapa

Los datos tomados en el laboratorio se encuentran en el Anexo 20 hasta el Anexo 24. A continuación se presentan un resumen del módulo de elasticidad estático de la primera etapa:

Tabla 23.- Primera etapa Módulo de elasticidad estático.

MEZCLAS	CILINDRO				A.C.I. 363 ⁶	
	Diámetro cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia MPa	Ec (Experimental) MPa	Ec (Ecuación) MPa
Hormigón convencional	15,20	30,45	56248	30,40	26170	25205
2 % polímero	15,23	30,40	45738	24,63	20338	23377

⁶ El código del ACI en el Capítulo 5 pagina 23, del Comité 363 expresa que el módulo estático de elasticidad podría ser calculado en función de la resistencia.

5 % polímero	15,23	30,50	41883	22,56	15492	22668
7 % polímero	15,23	30,45	37942	20,44	11118	21908
10 % polímero	15,22	30,50	36322	19,86	13070	21694

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

El hormigón modificado con adición de polímeros elásticos tiene valores menores de módulo de elasticidad, en relación al hormigón convencional.

Lo cual nos indica que son menos rígidos. En la mezcla del 10% de polímero elástico se presenta una elevación del módulo de elasticidad, debido a las deformaciones tomadas en el espécimen.

El módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta el contenido de polímero elástico, ya que se está sustituyendo el árido convencional por un material mucho más elástico. Permitiendo mayores deformaciones.

3.4.2.2. Resultados Segunda Etapa

Los datos tomados en el laboratorio se encuentran en el Anexo 25 y 26. A continuación se presentan un resumen del módulo de elasticidad estático de la segunda etapa:

Tabla 24.- Segunda etapa módulo de elasticidad con el porcentaje óptimo.

MEZCLAS	CILINDRO				A.C.I. 363	
	Diámetro	Altura	Carga	Resistencia	Ec (Experimental)	Ec (Ecuación)
	cm	cm	kg	MPa	MPa	MPa
Hormigón convencional	15,21	30,10	48657	26,26	21073	23914
2 % polímero óptimo	15,21	30,10	26774	14,45	18107	19521

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

En comparación del módulo de elasticidad respecto a la forma experimental y mediante la ecuación del A.C.I. 363, los resultados son similares. Lo cual nos indica que el módulo estático de elasticidad del hormigón es directamente proporcional al valor de la resistencia a la compresión.

3.4.3. Resistencia a la tracción por compresión diametral.

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

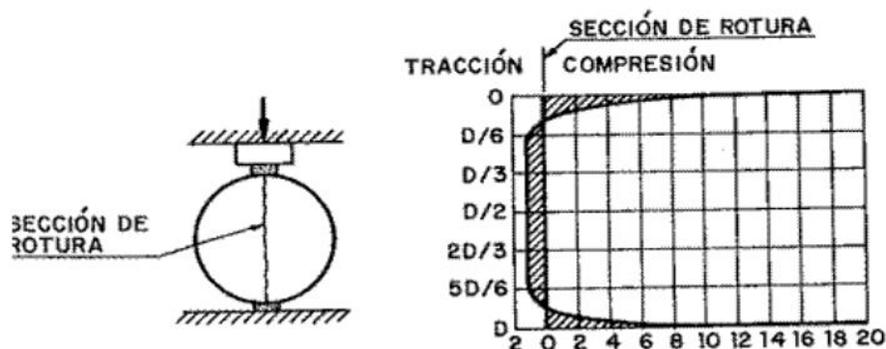


Ilustración 40.- Ensayo de Tracción Indirecta.

El ensayo de tracción por hendimiento o conocido como ensayo Brasileró, es un método experimental ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción del hormigón, en este ensayo se utilizan cilindros de hormigón de dimensiones ($D = 150 \text{ mm}$ y $L = 300 \text{ mm}$).

El ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica de hormigón, en la cual aplicamos la carga de manera uniforme a lo largo del cilindro formando una línea o generatriz hasta alcanzar la rotura.

“Esta carga induce esfuerzos a la tensión en el plano donde se aplica la carga y esfuerzos a la compresión relativamente altos en el área alrededor de la carga aplicada. La falla a la tracción ocurre antes de la falla a la compresión debido a que las áreas de aplicación de carga están en un estado de compresión triaxial, permitiendo de esa manera resistir mucho mayor esfuerzo a la compresión que el obtenido por un esfuerzo a la compresión uniaxial. (Romero, 2015)

Estas probetas estándar se fabrican utilizando moldes metálicos de forma cilíndrica, en donde se verterá el hormigón fresco para obtener un cilindro de la misma forma del molde, cuyas dimensiones cumplirán con la relación 2:1, entre la Altura de la probeta y el Diámetro del mismo, teniéndose la siguiente: Probeta: 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura

Desarrollo del ensayo según norma INEN 2648 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón” el esfuerzo de tracción f_t se calcula con la siguiente expresión:

$$f_t = \frac{2P}{\pi ld}$$

Dónde:

f_t = esfuerzo de Traccion en MPa

P = Carga aplicada en kN

l = longitud del cilindro en cilindro mm

d = Diametro del cilindro en mm



Ilustración 41.- Moldes Cilíndricos para probetas de Hormigón de 15 x 30 cm.

3.4.3.1. Determinación del número total de probetas en la investigación.

Para determinar el número de probetas de hormigón que se ensayarán para cada una de las diferentes condiciones, se elaboró 6 probetas para el Hormigón Convencional a diferencia de los ensayos a Compresión solo se elabora para los 28 días, un total de 30 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.

Tabla 25.- Total Probetas hormigón Convencional

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)			Total Probetas
		3	7	28	
Resistencia a la tracción por compresión diametral	INEN 2648			6	6

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Tabla 26.- Total probetas hormigón Modificado

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)				Total Probetas
		28				
		Adición Polímero (%)				
		2	5	7	10	
Resistencia a la tracción por compresión diametral	INEN 2648	6	6	6	6	24

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Se realizó ensayos de al menos 6 especímenes en la edad de 28, tanto del Hormigón Patrón y Modificado correspondientes a la primera etapa de la investigación, con el objeto de evaluar el desarrollo de un concreto convencional en comparación al Modificado, además de ir registrando detalles de mediciones de los cilindros, Cargas, Tipo de Fracturas y Curvas de Resistencias se encuentran tabulados en los Anexos.

3.4.3.2. Resultados – Tabulaciones Primera Etapa

a) Resumen de Resultados

Anterior al ensayo de cada probeta se tomó datos de cada una como la altura promedio de cada cilindro, diámetro promedio de cada cilindro y carga máxima de Tracción, todos estos parámetros permiten posteriormente calcular el área de cada cilindro y la resistencia máxima del ensayo.

Tabla 27.- Resistencia C. Diametral hormigón Convencional y Modificado.

Edad del espécimen (días)	MEZCLA Hormigón	Promedio Resistencia C. Diametral (MPa)
28	Convencional	3.97
28	Modificado 2%	3.74
28	Modificado 5%	3.25
28	Modificado 7%	3.15
28	Modificado 10%	2.61

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

La resistencia de Compresión Diametral del hormigón Convencional da mayor resultado que el hormigón Modificado que las que emplea caucho añadido a la mezcla.

b) Control de Datos Individuales Laboratorio

Tabla 28.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión Diametral.

Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Cilindros	Diámetro Promedio (mm)	Longitud Promedio (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia por comp. Diam. (MPa)	Promedio Res. C. Diametral (MPa)
HORMIGON CONVENCIONAL							
26/08/2015	23/09/2015	N4	152,33	305,50	205,237	2,808	3,972
26/08/2015	23/09/2015	N1	152,17	304,75	354,031	4,860	
26/08/2015	23/09/2015	N2	152,00	304,75	318,371	4,375	
26/08/2015	23/09/2015	N3	152,18	304,75	272,559	3,741	
26/08/2015	23/09/2015	N5	152,25	304,50	305,692	4,198	
26/08/2015	23/09/2015	N6	152,32	304,50	280,382	3,849	
HORMIGON MODIFICADO + 2 % Caucho							
27/08/2015	24/09/2015	6%2	151,83	304,25	338,382	4,663	3,741
27/08/2015	24/09/2015	3%2	151,33	303,75	219,526	3,040	
27/08/2015	24/09/2015	5%2	151,92	303,50	254,929	3,520	
27/08/2015	24/09/2015	2%2	151,98	304,00	270,569	3,728	
27/08/2015	24/09/2015	1%2	152,40	304,50	280,731	3,851	
27/08/2015	24/09/2015	4%2	152,17	303,50	264,193	3,642	
HORMIGON MODIFICADO + 5 % Caucho							
28/08/2015	25/09/2015	1%5	152,28	304,00	225,924	3,107	3,245
28/08/2015	25/09/2015	2%5	152,55	304,50	240,569	3,297	
28/08/2015	25/09/2015	3%5	151,66	304,50	240,213	3,311	
28/08/2015	25/09/2015	5%5	152,24	305,50	244,194	3,342	
28/08/2015	25/09/2015	4%5	152,33	304,50	235,742	3,235	
28/08/2015	25/09/2015	6%5	152,25	304,00	230,834	3,175	
HORMIGON MODIFICADO + 7 % Caucho							
31/08/2015	28/09/2015	1%7	152,33	304,00	205,592	2,826	3,150
31/08/2015	28/09/2015	2%7	152,20	303,50	253,578	3,495	
31/08/2015	28/09/2015	4%7	152,17	304,00	234,171	3,223	
31/08/2015	28/09/2015	3%7	152,23	303,50	227,346	3,133	
31/08/2015	28/09/2015	5%7	152,37	304,00	231,742	3,185	
31/08/2015	28/09/2015	6%7	152,30	303,50	220,834	3,041	
HORMIGON MODIFICADO + 10 % Caucho							
01/09/2015	29/09/2015	3%10	152,18	303,50	179,645	2,476	2,605
01/09/2015	29/09/2015	1%10	152,22	304,00	198,057	2,725	
01/09/2015	29/09/2015	4%10	152,05	303,00	165,569	2,288	
01/09/2015	29/09/2015	6%10	152,25	304,00	194,645	2,677	
01/09/2015	29/09/2015	2%10	152,15	303,50	175,643	2,421	
01/09/2015	29/09/2015	6%10	152,30	303,50	220,834	3,041	

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo27.

3.4.3.3. Resultados – Tabulaciones Segunda Etapa

a) Resumen de Resultados

La tendencia de resultados de la primera etapa no cambia con la dosificación óptima ya que también los resultados del hormigón convencional son mayores que el modificado en el presente ensayo.

Anterior al ensayo de cada probeta se tomó datos de cada una como la altura promedio de cada cilindro, diámetro promedio de cada cilindro y carga máxima de Tracción, todos estos parámetros permiten posteriormente calcular el área de cada cilindro y la resistencia máxima del ensayo.

Tabla 29.- Resistencia C. Diametral hormigón Convencional y Modificado

Edad del espécimen (días)	MEZCLA Hormigón	Promedio Resistencia C. Diametral (MPa)
28	H.C.	4,12
28	H.M.-2%G	3,53

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

La resistencia de Compresión Diametral del hormigón Convencional da mayor resultado que el hormigón Modificado que las que emplea caucho añadido a la mezcla.

b) Control de Datos Individuales Laboratorio

Tabla 30.- Tabla de Ensayos realizados de las Probetas Cilíndricas a Compresión Diametral.

Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Cilindros	Diámetro Promedio (mm)	Longitud Promedio (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia por comp. Diam. (MPa)	Promedio Resistencia C. Diametral (MPa)
HORMIGON CONVENCIONAL							
07/12/2015	04/01/2016	N1	151,80	306,00	300,217	4,115	4,124
07/12/2015	04/01/2016	N2	152,23	305,00	265,308	3,638	
07/12/2015	04/01/2016	N3	152,25	304,00	321,013	4,415	

07/12/2015	04/01/2016	N4	151,92	303,00	313,294	4,333	
07/12/2015	04/01/2016	N5	151,67	303,00	298,642	4,137	
07/12/2015	04/01/2016	N6	152,08	305,00	312,486	4,289	
07/12/2015	04/01/2016	N7	152,17	303,50	305,623	4,213	
07/12/2015	04/01/2016	N8	151,60	303,50	297,269	4,113	
07/12/2015	04/01/2016	N9	152,33	303,50	303,631	4,181	
07/12/2015	04/01/2016	N10	151,75	304,00	275,829	3,806	
HORMIGON MODIFICADO + 2 % Caucho							
08/12/2015	05/01/2016	1%2	151,85	304,00	264,668	3,650	3,533
08/12/2015	05/01/2016	2%2	152,42	303,00	270,071	3,723	
08/12/2015	05/01/2016	3%2	151,98	304,00	231,327	3,187	
08/12/2015	05/01/2016	4%2	152,18	305,00	261,043	3,580	
08/12/2015	05/01/2016	5%2	151,58	303,00	249,813	3,463	
08/12/2015	05/01/2016	6%2	152,17	304,00	255,549	3,517	
08/12/2015	05/01/2016	7%3	151,63	303,00	251,713	3,488	
08/12/2015	05/01/2016	8%2	152,40	303,50	265,543	3,655	
08/12/2015	05/01/2016	9%2	152,10	303,00	243,724	3,367	
08/12/2015	05/01/2016	10%2	152,32	303,50	268,639	3,700	

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo 28.

3.4.4. Resistencia a la flexión (Vigas).

Este método de ensayo cubre la determinación del esfuerzo de flexión del hormigón utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz.

Este ensayo sirve para determinar la resistencia de elementos que van estar sometidos a la Flexión, particularmente en Vigas de sistemas estructurales, donde este parámetro es indispensable para asegurar el comportamiento a de la estructura a Cargas Criticas. Los resultados se calcularan y Reportaran como el Modulo de Rotura.

La elaboración de los especímenes se efectuó utilizando moldes metálicos de forma cubica, en donde se verterá el hormigón fresco para obtener una viga cubica de la misma forma del molde, cuyas dimensiones cumplirán con la disposición prevista en la NTE INEN 2554, teniéndose la siguiente: Probeta: 15 cm. Ancho; 15 cm de alto y 50 cm. de longitud.

3.4.4.1. Determinación del número total de probetas en la investigación.

Para determinar el número de probetas de hormigón que se ensayarán para cada una de las diferentes condiciones, se elaboró 6 probetas para el Hormigón Convencional a diferencia de los ensayos a Compresión solo se elabora para los 28 días, un total de 30 probetas de 15 x 15 x 50 cm.

Tabla 31.- Total Probetas hormigón Convencional, Ensayo a Flexión.

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)			Total Probetas
		3	7	28	
Resistencia a la flexión	INEN 2554			6	6

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Tabla 32.- Total probetas hormigón Modificado Ensayo a Flexión

ENSAYOS	NORMAS	Edad del hormigón (días)				ENSAYOS
		28				
		Adición Polímero (%)				
		2	5	7	10	
Resistencia a la flexión	INEN 2554	6	6	6	6	24

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Se realizó ensayos de al menos 6 especímenes en la edad de 28 días, tanto del Hormigón Convencional y Modificado correspondientes a la primera etapa de la investigación, con el objeto de evaluar el desarrollo de un concreto convencional en comparación al Modificado, además de ir registrando detalles de mediciones de las vigas cubicas, Cargas, Tipo de Fractura dentro del tercio medio de la Viga o fuera que se encuentran tabulados en los Anexos.

3.4.4.2. Resultados de la Primera Etapa

Los resultados en la determinación de la siguiente propiedad mecánica es el más trascendental, ya que mejora la resistencia del hormigón Modificado en el porcentaje de adición del 2 % de Polímero Elástico en comparación al Hormigón Convencional.

Posterior al ensayo de cada probeta cubica se tomó datos del ancho y alto en la rotura de la viga ensayada, carga máxima de Tracción, todos estos parámetros permiten posteriormente calcular el Modulo de Rotura de cada espécimen.

Tabla 33.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado

Edad del espécimen (días)	Hormigón	Promedio Resistencia Flexión (MPa)
28	H.N	6.18
28	H.M.+2%F	7.27
28	H.M.+5%F	5.74
28	H.M.+7%F	5.43
28	H.M.+10%F	6.77

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Se observa en la tabla que mientras mayor es el porcentaje del Caucho la resistencia a la flexión aumenta; al añadir el 10 % de Caucho al hormigón la resistencia demuestra una mejoría por tal razón se elabora para la comprobación de tales resultados otros probetas de ensayo.

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo 29.

3.4.4.3. Resultados de la Segunda Etapa

Para verificar los resultados de la primera etapa, en que al añadir Polímero Elástico al hormigón Convencional mejora las propiedades, en este ensayo se realizó nuevos probetas en las cuales los resultados en la determinación de la siguiente propiedad mecánica sigue siguiendo más notable, ya que mejora la resistencia del hormigón Modificado en el porcentaje de adición del 2 % de Polímero Elástico en comparación al Hormigón Convencional. Resultados del hormigón modificado óptimo.

Tabla 34.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado

SEGUNDA ETAPA COMPROBACION DE RESULTADOS

Edad del espécimen (días)	Hormigón	Promedio Resistencia Flexión (MPa)
28	H.N	5,47
28	H.M.+2%F	5,69
28	H.M.+10%F	3,37

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

En la siguiente tabla se presenta los resultados con la restitución del Polímero Elástico en relación al peso del agregado grueso, a diferencia de la adición en estos ensayos el módulo de rotura cae en un decremento, por lo cual no es beneficioso en la pretensión de la investigación. Pero son datos importantes para la existencia de datos comparativos.

Tabla 35.- Resumen de Resistencia a la flexión hormigón Convencional y Modificado Restitución

SEGUNDA ETAPA H.MODIFICADO SUSTITUCIÓN - 2%G

Edad del espécimen (días)	Hormigón	Promedio Resistencia Flexión (MPa)
28	H.N	4,22
28	H.M.-2%F	3,67

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Los datos de Laboratorio en donde se detalla más completamente cada uno de los especímenes ensayados, fecha de elaboración y ensayo, dimensiones de probeta se detallan en el Anexo30.

3.4.5. Densidad, Absorción y Porosidad

El ensayo describe un método para la determinación de la densidad, porcentaje de Absorción y, porcentaje de huecos en el hormigón endurecido.

Para ello, es necesario someter tres muestras de cada tipo de hormigón a inmersión durante 24 horas y, a continuación, se ha secado en una estufa a una temperatura entre 100 y 110 °C durante 24 horas más. Con este procedimiento se obtiene la masa aparente en el agua, la masa saturada superficie seca y la masa seca, respectivamente, datos necesarios para poder

determinar la densidad, absorción y porosidad del hormigón endurecido. El ensayo de resistencia densidad, porosidad y absorción se ha realizado siguiendo la norma ASTM C 642.

3.4.5.1. Resultados de la primera etapa.

Tabla 36.- Absorción, densidad y porosidad hormigón convencional

Resultados de prueba de absorción, densidad y porosidad a la edad 28 días

Muestra	Densidad absoluta	Absorción después de inmersión	Densidad seca global (o bruta)	Densidad aparente	Volumen de vacíos (espacio de poros permeables)	Volumen total de vacíos
	g/cm³	%	g/cm³	g/cm³	%	%
H.C.	2,28	6,11	2,09	2,37	12,14	8,53
N.M. + 2%F	2,26	6,18	2,07	2,35	11,90	8,35
N.M. + 5%F	2,17	6,56	2,06	2,36	12,56	5,05
N.M. + 7%F	2,26	9,29	2,09	2,52	16,95	7,50
N.M. + 10%F	2,17	8,76	2,14	2,56	16,39	1,47

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

Se presenta los resultados de los ensayos del Hormigón Modificado con los porcentajes de adición.

3.4.5.2. Resultados de la Segunda Etapa.

Se presentan los resultados de las probetas ensayadas para la obtención de los datos del Hormigón óptimo.

Tabla 37.- Absorción, densidad y porosidad hormigón convencional.

Resultados de prueba de absorción, densidad y porosidad a la edad 28 días

Muestra	Densidad absoluta	Absorción después de inmersión	Densidad seca global (o bruta)	Densidad aparente	Volumen de vacíos (espacio de poros permeables)	Volumen total de vacíos
	g/cm³	%	g/cm³	g/cm³	%	%
H.C.	2,25	4,74	2,02	2,35	13,72	9,82
N.M. -2%F	2,21	6,32	1,98	2,36	16,08	10,44

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

3.4.6. Adherencia entre hormigón – acero sometidos a cargas.

Los ensayos fueron realizados sobre probetas cúbicas de 10x10x10 cm, con curado normalizado y de 28 días de edad. Para que los resultados sean representativos se ensayaron 6 probetas por cada dosis de caucho. Las mediciones de los desplazamientos se realizaron con un deformímetro. La longitud adherida de la barra se ha establecido en 5ϕ como máximo, por lo que este tipo de pruebas se denominan ensayos sobre longitudes cortas.

Los modelos de ensayo fueron caracterizados por la falla por deslizamiento en los prismas de concreto con las barras de acero.

La fórmula para obtener el esfuerzo promedio de adherencia es la siguiente:

$$\mu = \frac{d_b \times f_s}{4 \times ld}$$

Dónde:

μ = esfuerzo promedio de adherencia (MPa)

d_b = diámetro de la varilla (mm)

f_s = esfuerzo ocasionado en la varilla de acero por la fuerza de tensión (MPa)

ld = la longitud de la varilla ahogada en el concreto (mm)

3.4.6.1. Resultados – Tabulaciones Primera Etapa

Tabla 38.- Primera etapa esfuerzo de adherencia.

MEZCLAS	Fuerza tensión (kN)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de Adherencia (MPa)	Tipo de falla
Hormigón convencional	17,49	222,69	10,46	Pull - put
N.M. + 2%F	15,24	194,05	9,04	Pull - put
N.M. + 5%F	12,41	158,05	7,86	Pull - put
N.M. + 7%F	10,84	138,00	6,76	Pull - put
N.M. + 10%F	10,83	137,83	6,58	Pull - put

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

En lo que se refiere al comportamiento de los hormigones utilizados, la fuerza de tensión decrece con relación al hormigón convencional. La resistencia a la compresión del concreto y el diámetro de las barras de acero tienen fuerte influencia en el resultado de la resistencia a la adherencia.

3.4.6.2. Resultados – Tabulaciones Segunda Etapa

Los datos tomados en el laboratorio se encuentran en el Anexo 39 hasta 46. A continuación se presentan un resumen del esfuerzo de adherencia de la segunda etapa:

Tabla 39.- Segunda etapa determinar el esfuerzo de adherencia.

MEZCLAS	Fuerza tensión (kN)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de Adherencia (MPa)	Tipo de falla
Hormigón convencional	15,31	194,88	9,36	Pull - put
N.M. -2%F	10,01	127,48	5,83	Pull - put

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

CAPÍTULO IV

4. DISCUSIÓN

4.1. ENSAYOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

El objetivo principal de la investigación fue determinar la cantidad óptima de polímero elástico para un hormigón modificado de 28 MPa mediante ensayos de laboratorio y así obtener su influencia en algunas propiedades del concreto. Se cumplió los procedimientos de acuerdo al Capítulo II del presente estudio (Metodología de la investigación). Posteriormente se logró tabular los resultados Capítulo III, de los diferentes ensayos, para así cumplir los objetivos específicos planteados.

4.1.1. Propiedades de los áridos (Fino y Grueso).

Para la selección de los agregados visitamos la *Cantera Cerro Negro (Castro Hnos.)*, se escogió dicha cantera por los buenos resultados en los anteriores estudios realizados. Donde el agregado grueso que más se comercializa para la realización de hormigones es el ripio triturado de tamaño nominal $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada. Los agregados de esta cantera son producto de la trituración de la roca procedente de la zona, estos posteriormente son tamizados; el resultado final es el agregado grueso de distintos tamaños nominales. El agregado fino es producto de la pulverización del agregado grueso. Para la realización de los ensayos tomamos muestras de ripio de 1 pulgada y arena triturada, la cuales fueron transportadas hasta el Laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para la selección de las muestras requeridas para la realización de los diferentes ensayos se procedió al cuarteo, que consiste en el proceso de reducir una muestra representativa, en una cantidad necesaria para realizar un determinado ensayo, esto quiere decir que se divide la muestra en dos o más partes, hasta llegar al tamaño o cantidad requerida.

El agregado fino que se utiliza en la elaboración de hormigón, no cumple con el requisito de gradación establecido en la norma INEN 872⁷, ya que tiene un módulo de finura de 3.59, y su granulometría no queda comprendida entre los límites especificados. Para lo cual se lo separo

⁷ Entre dos tamices cualquier consecutivo, no debe quedar retenido más del 45% del árido fino, y su módulo de finura no debe ser menor de 2,3 ni mayor de 3,1. (INEN 872, 1982-12)

en dos fracciones utilizando el tamiz N° 4, la fracción que retiene el tamiz fue rechazada, mientras que la fracción que pasa, tiene un módulo de finura de 2,97 dentro del rango que se especifican en la norma INEN 872. De esta manera se logró obtener un agregado fino que cumpla con los requisitos establecidos en el Código Ecuatoriano de la Construcción.

El **porcentaje de absorción** del agregado grueso es 2,24 %, indica una porosidad, propia de las andesitas y los materiales piro clásticos.

Tabla 40.- Características físicas de los agregados.

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDAD	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
		ARENA	RIPIO TRITURADO
Densidad Aparente	g/cm ³	2,555	2,563
Gravedad específica con SSS	g/cm ³	2,40	2,45
Peso unitario suelto	g/cm ³	1,536	1,544
Capacidad de Absorción	%	4,57	2,24
Contenido de Humedad	%	5,36	0,86
Módulo de finura		3,59	

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

La **densidad aparente** de los agregados es mayor, por lo que se consideran el volumen de los poros. Por lo general, los cálculos que se refieren al hormigón se basan en condiciones de Saturado y Superficialmente Seco de los agregados SSS, ya que el agua que contienen todos los poros no toma parte en la reacción química del cemento.

En la presente investigación la densidad y peso unitario suelto del agregado fino (2,398 g/cm³) es menor en comparación del agregado grueso (2,452 g/cm³), debido a la relación entre masas de los dos agregados.

El agregado fino tiene mayor capacidad de **absorción** (4,57%), lo cual retendrá la mezcla de agua-cemento en el interior de sus cavidades, reduciendo así la cantidad de mezcla que debería estar cementando las partículas del conjunto de los agregados.

Como el **contenido de humedad** del agregado cambia con el clima, es necesario determinar con frecuencia este valor. En la presente investigación para controlar el grado de humedad en los áridos, se cubrió toda la superficie del lote con plástico. Se debió verificar la humedad de

los áridos para cada mezcla diferente, por lo que si se tiene una cantidad menor de agua que la óptima disminuye la manejabilidad, en cambio si se tiene cantidades superiores a la óptima disminuye su resistencia y durabilidad.

4.1.2. Propiedades del polímero elástico reciclado.

Las llantas están compuestas de una gran cantidad de materiales, dependiendo del uso al cual se destinan, sus características especiales como resistencia a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia. El polímero elástico que utilizamos en la presente investigación fue adquirido a través de un proceso de trituración mecánica, en la cual se reduce el tamaño de las llantas por medio de la máquina trituradora con el fin de separar el polímero de elementos como el acero y los textiles.

Se trituran paulatinamente las llantas hasta alcanzar el tamaño mínimo requerido, la mayor ventaja de este proceso es que se obtienen productos de buena calidad con un reducido número de etapas de proceso; adicionalmente no requiere de etapas de purificación ya que no se emplean sustancias ajenas a las llantas. El uso de agregados de caucho en el hormigón puede satisfacer la demanda para la conservación de un medio ambiente limpio reciclando neumáticos utilizados.



Ilustración 42.- Polímero elástico reciclado.

Luego de analizar el polímero elástico en diferentes formas (trozos de diferentes tamaños y tiras de diferentes longitudes), se concluyó que las tiras de polímero elástico adecuadas corresponden a las siguientes dimensiones: con una longitud entre 0,3 a 2,5 cm, diámetro aproximado de 1 a 2mm. Las cuales presentan una superficie rugosa y su contenido de

Humedad es de 1,80 %. Verificando con la capacidad de absorción (2,01%) del polímero elástico, se puede decir que no aporta agua a la mezcla, ni se requiere la corrección por humedad. Es decir, la relación de absorción y contenido de humedad se equilibran. Ver en el Anexo 4 y 8.

4.2. MÉTODO DE DISEÑO

El diseño de mezclas es un proceso que consiste en calcular las proporciones de los elementos que conforman el hormigón, con el fin de obtener los mejores resultados y un máximo de las propiedades esperadas, tanto en su estado fresco, como endurecido y lógicamente, con el menor costo posible. Por lo tanto, los materiales se escogen, con el fin de conseguir las características esperadas en la mezcla y mediante una adecuada dosificación, se consiguen adecuadas propiedades en el hormigón.

*Para la elaboración de las mezclas de hormigón se utilizó el método por **Densidad óptima**, que es el más aplicado para elaborar hormigones convencionales (de baja y mediana resistencia). Se calculará para una resistencia de 280 kg/cm², tanto para el hormigón modificado y como para el hormigón convencional.*

El adecuado proporcionamiento de los componentes del hormigón dan a este la resistencia, durabilidad, comportamiento, consistencia, trabajabilidad y otras propiedades que se necesitan en determinada construcción y condiciones de exposición. Además, con la óptima dosificación de los materiales, se logrará evitar las principales anomalías en el hormigón fresco y endurecido, como la segregación, exudación, fisuramiento por contracción plástica y secado, entre otras. Se realizaron varias pruebas iniciales con diferentes dosificaciones, para lograr establecer una dosificación que cumpla con los objetivos requeridos, también se realizó la corrección por asentamiento para cada mezcla.

Primero se fijaron los consumos de cemento a utilizar en cada mezcla, es decir 15 kg, para la primera etapa (adición de polímero en varios porcentajes) y la segunda etapa (sustitución de polímero con el porcentaje óptimo).

En la presente tabla, se encuentran las cantidades correspondientes al agua de mezclado utilizada, la cantidad de cemento, polímero elástico y agregados.

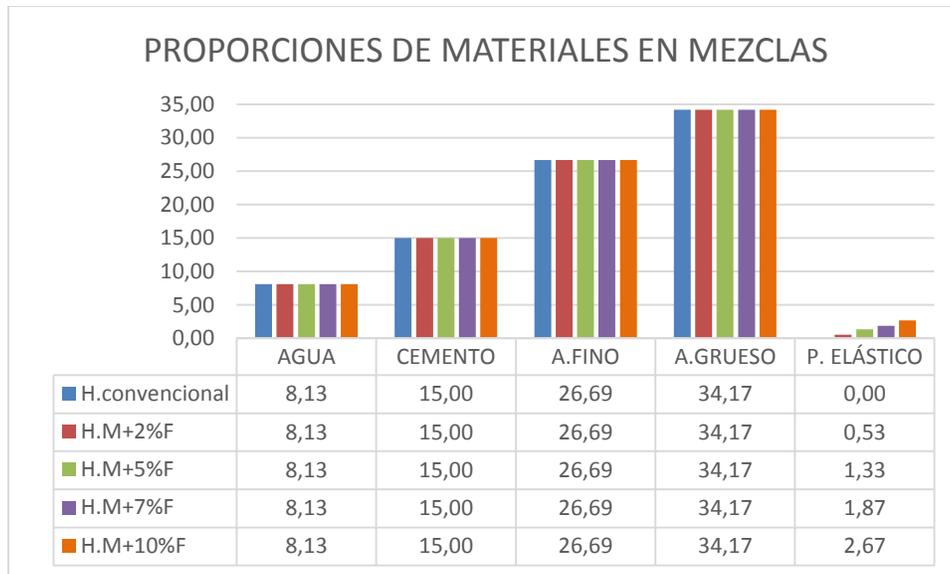


Ilustración 43.- Componentes del Hormigón por método de densidad óptima. Primera etapa

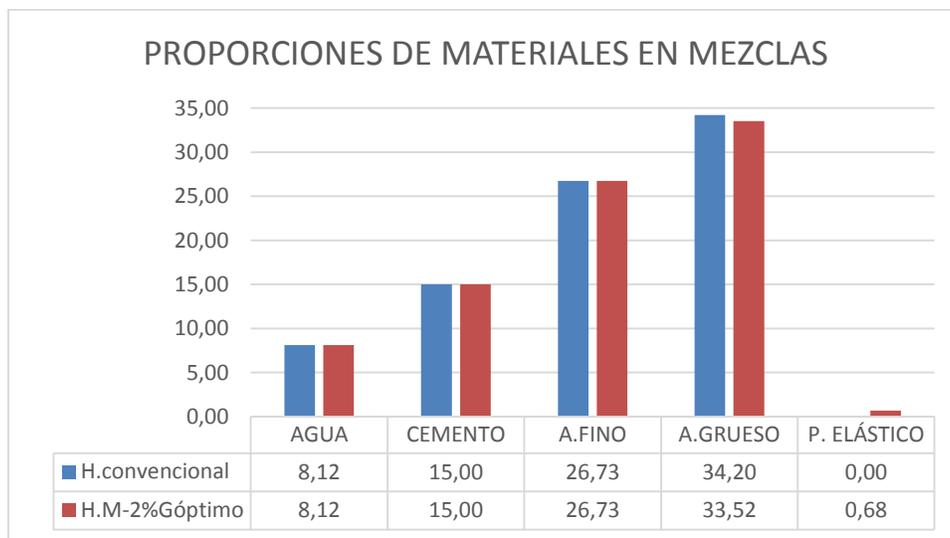


Ilustración 44.- Componentes del hormigón por método de densidad óptima. Segunda etapa

Como se puede evidenciar en las ilustraciones, se utilizó una relación agua/cemento (a/c) igual a 0.525, lo cual es importante pues el cemento es el material que tiene mayor costo, al emplear menor cantidad de cemento es un ahorro en la producción del hormigón. En la primera etapa se observa que los materiales componentes del hormigón tales como agua, cemento, agregados se mantienen constante. Pero en la segunda etapa hay una reducción del Agregado grueso en relación a la cantidad del polímero elástico.

4.3. ENSAYOS ANTES DEL FRAGUADO

Sin duda, una mezcla bien diseñada debe ser capaz de ser mezclada, transportada, colocada y compactada con el equipamiento disponible. La aptitud de la mezcla para que tenga una correcta terminación también es un factor a tener en cuenta, debiendo minimizarse la exudación y la segregación.

4.3.1. Asentamiento.

El asentamiento conocido también como slump por su nombre en inglés, es una medida de la trabajabilidad del hormigón fresco. Esta medida es un parámetro importante al momento de evaluar la calidad del hormigón en obra, es tal su importancia que se consideró al momento de realizar el diseño de la mezcla. Las mezclas fueron diseñadas para para alcanzar un asentamiento de 10 cm.

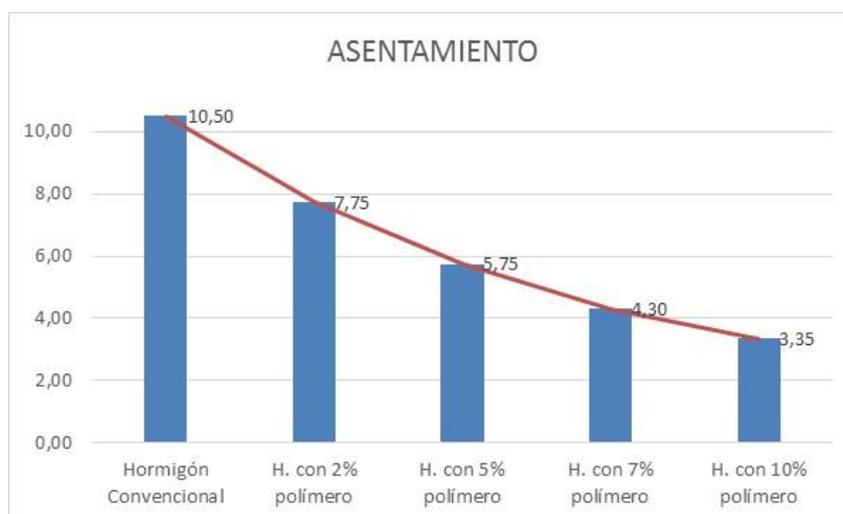


Ilustración 45.- Resultados del ensayo de asentamiento con diferentes porcentajes.

El asentamiento promedio del Hormigón convencional corresponde a una mezcla con una trabajabilidad buena, aunque requiere de cierta compactación para ser colocado. En cambio, para la adición de los diferentes porcentajes (2, 5, 7, 10%), disminuye la trabajabilidad de las mezclas.

En general se puede decir que mientras mayor sea la medida del asentamiento, mayor será la capacidad de trabajarlo y de darle la forma deseada, sin embargo, se debe tener en cuenta los

problemas asociados con un asentamiento muy grande, como el sangrado y la pérdida de resistencia debido a una mayor relación Agua/Cemento.

4.3.2. Densidad, Rendimiento y Contenido de aire en el hormigón fresco.

El peso unitario, es decir el peso que tiene un volumen determinado, tiene gran importancia al momento de diseñar una estructura, pues es éste el que determinará el peso final de la estructura. En el caso del hormigón de uso convencional (para pavimentos, edificios y en otras estructuras), se estima que tiene un peso unitario en el rango de 2240 y 2400 kg/m³. El peso unitario del concreto puede variar, dependiendo de las cantidades y de la densidad relativa de los agregados, así como de la cantidad del aire contenido (atrapado o incluido intencionalmente), y de los contenidos de agua y de cemento, los que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado a utilizar. Para el diseño de estructuras de hormigón, generalmente se supone que la combinación del hormigón convencional y de las barras de refuerzo (hormigón reforzado), tiene un peso unitario de 2400 kg/m³.

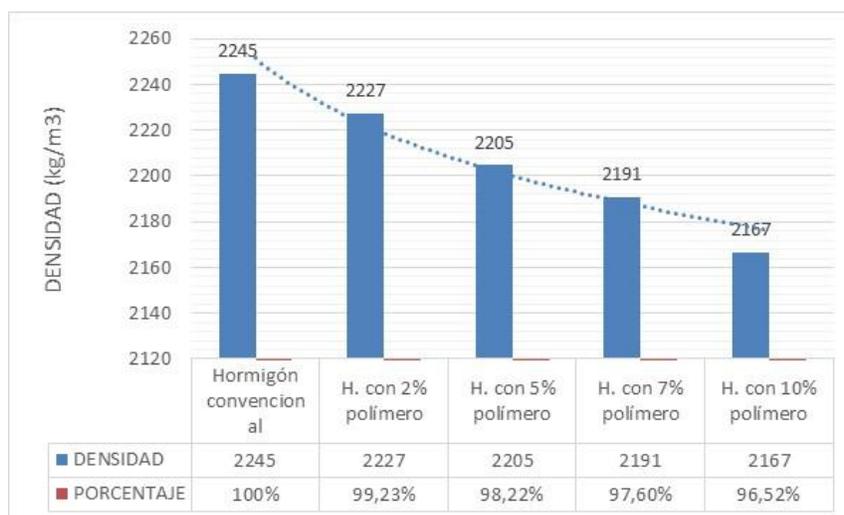


Ilustración 46.- Densidad de las diferentes mezclas del hormigón.

La densidad del hormigón se ve claramente disminuida con el aumento del porcentaje de polímero elástico, esto se debe a la diferencia de densidades entre el polímero y los agregados. Disminuyendo la densidad en 0.77, 1.00, 0.62 y 1.08 % para el 2, 5, 7, 10% de adición del polímero respectivamente, con relación al hormigón convencional. La densidad del hormigón convencional se encuentra entre los rangos recomendados (2245 kg/m³).

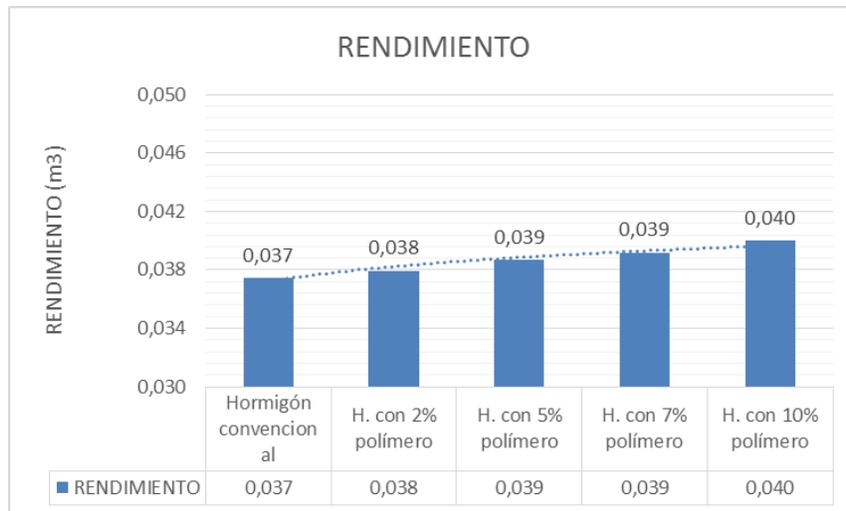


Ilustración 47.- Rendimiento de las diferentes mezclas del hormigón.

El rendimiento equivale al volumen del hormigón producido en una mezcla, de las que se conocen las cantidades de los materiales componentes. En la presente investigación el rendimiento de cada mezcla asciende respecto al porcentaje de adición 2, 5, 7, 10% del polímero elástico respectivamente.

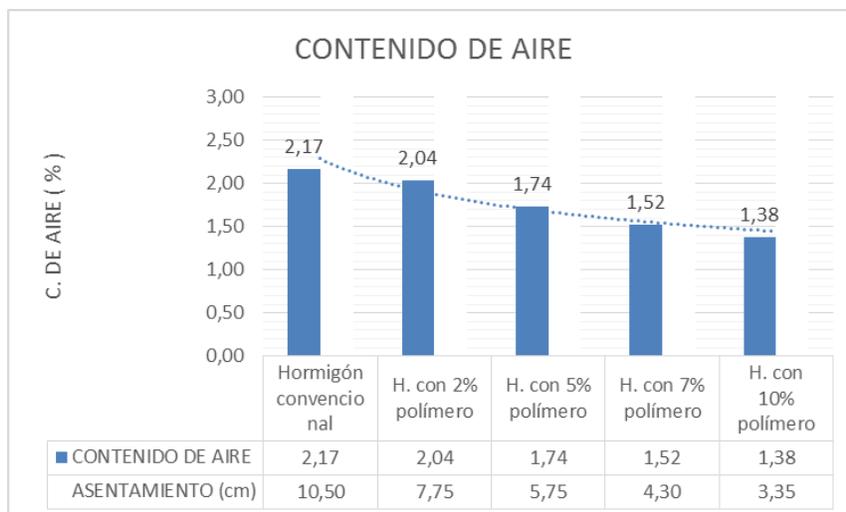


Ilustración 48.- Contenido de aire de las diferentes mezclas del hormigón.

Determinamos la cantidad de aire que puede contener el hormigón recién mezclado excluyendo cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados, generalmente todo concreto contiene menos de 2% en el volumen de aire. El aire existe normalmente en el concreto en forma de huecos dispersos.

Se puede realizar una correlación entre el asentamiento y el porcentaje del contenido de aire en el hormigón. Ya que el aire mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del hormigón fresco a segregarse. Como se aprecia en la ilustración anterior, el hormigón convencional tiene mayor contenido de aire por ende mayor asentamiento.

4.4. ENSAYOS DESPUES DEL FRAGUADO

4.4.1. Compresión de cilindros.

Según las figuras siguientes se realiza un análisis comparativo de las resistencias obtenidas en los ensayos realizados que comprenden dos Etapas de ensayos: la primera que contiene pruebas de resistencias de Hormigón convencional y Hormigón modificado (adición polímero elástico 2, 5, 7, 10 % en relación al agregado fino); una segunda etapa en la que también se evalúa la resistencia del hormigón convencional además de un hormigón modificado (sustitución del 2% de polímero elástico correspondiente al agregado grueso).

4.4.1.1. Análisis de resultados.

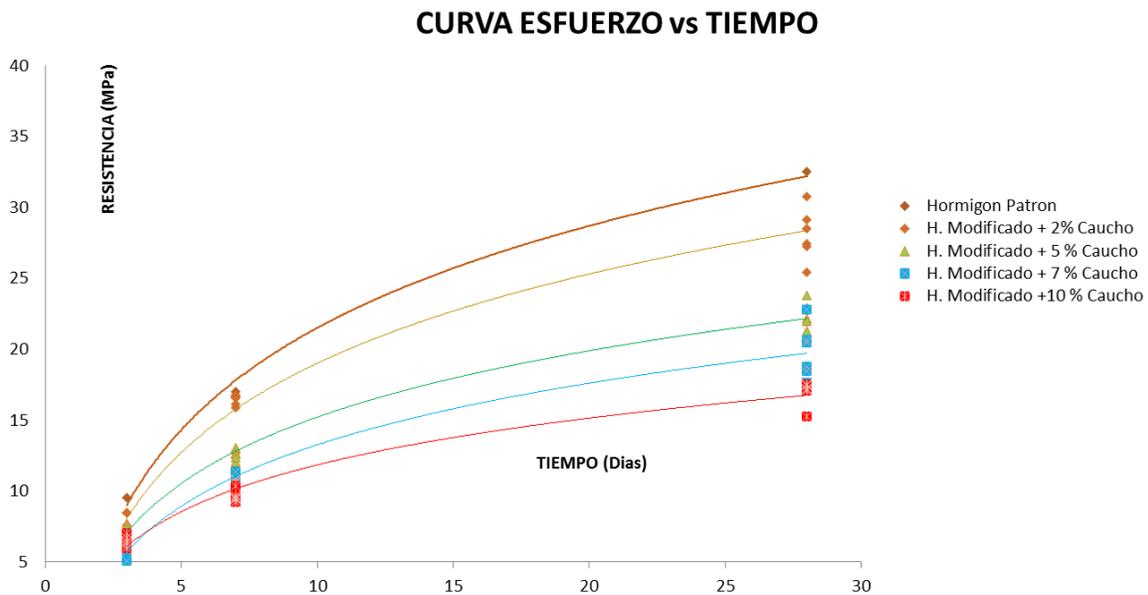


Ilustración 49.- Comparación de Resultados 1 Etapa.

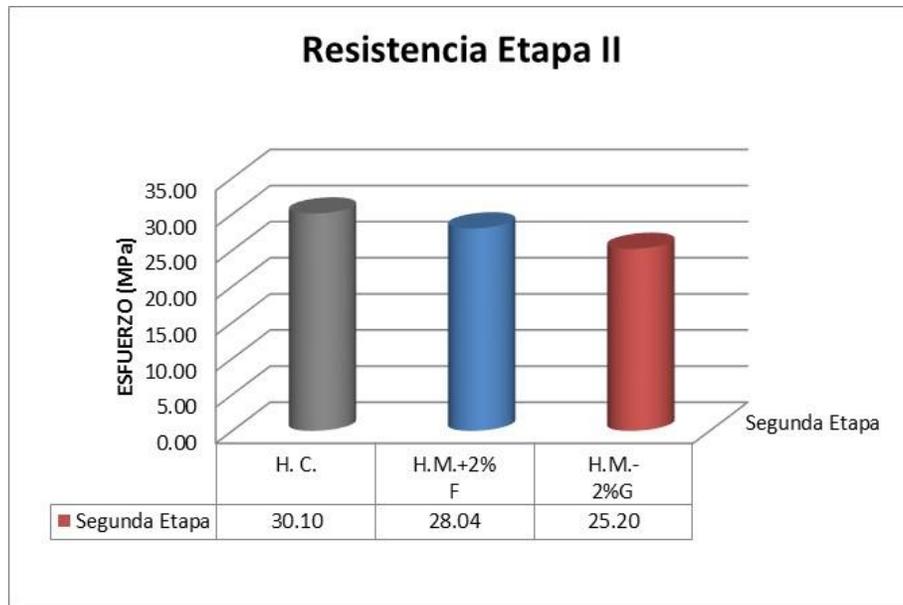


Ilustración 50.- Comparación de Resultados 2 Etapa.

Según la distinción de las resistencias a compresión de ambas etapas se puede examinar que al añadir o restituir polímero elástico en cualquier porcentaje al hormigón convencional esta baja la resistencia; pero como la finalidad de la investigación es establecer una dosificación óptima que llegue a una capacidad de 28 MPa en un hormigón modificado. La composición de Hormigón que tiene un mejor comportamiento es cuando se añade en 2 % con respecto al peso del agregado fino en la proporción final del diseño.

Para los siguientes ensayos se diseñaron proporciones similares de los agregados componentes del hormigón para ambas etapas para que no exista variación, por causas climatológicas, tiempo de fraguado, contenido de humedad de los agregados.

Como se observa, los compuestos con partículas de polímero elástico muestran una disminución al compararlo con el valor del concreto convencional, siendo el porcentaje de disminución de 7 y 16%. Además, la adición 2% del polímero elástico en el compuesto produce un menor porcentaje de disminución debido a que las partículas de polímero actúan como poros dentro de la mezcla; ellas no incrementan la resistencia mecánica del concreto tal como lo hacen los agregados finos a la pasta, ya que el caucho es más elástico que el cemento endurecido.

4.4.1.2. Tipos de Fallas.



Ilustración 51.- Falla tipo 2 Hormigón Convencional.

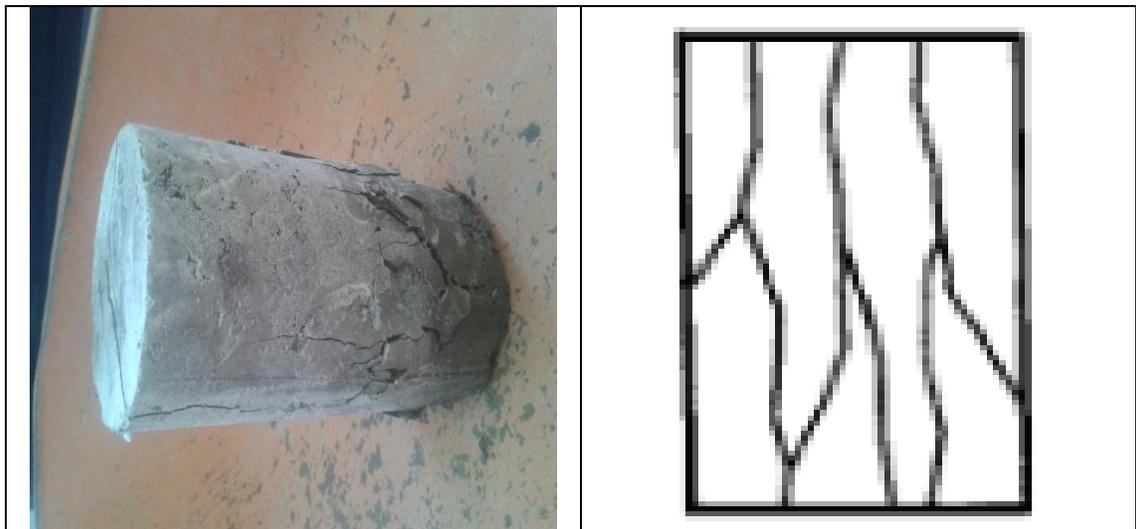




Ilustración 52.- Falla tipo 2 Hormigón Modificado.

La falla más común tanto del hormigón convencional como del modificado, fue del tipo 2 según la norma INEN, el cual se obtiene haciendo una media aritmética de las fallas más presentadas en todos los ensayos realizados.

Hormigón convencional	Hormigón modificado
	



En los diferentes ensayos realizados después del fraguado, las roturas eran de diferentes tipos y formas. Pero se puede diferenciar las probetas de hormigón convencional con las modificadas. Debido a que cuando las probetas no contenían polímero elástico en su interior, las fallas eran de una forma explosiva y las grietas se propagan inmediatamente provocando una falla instantánea. En cambio, con las probetas que contenían polímero elástico se mantienen ambos lados de las grietas juntos, permitiendo que soporte grandes deformaciones. Esto se debe a que los especímenes con polímero mostraban una alta capacidad para absorber energía plástica.

4.4.2. Módulo de elasticidad estático del concreto por compresión de cilindros.

El módulo de elasticidad o módulo de Young se conoce como la relación entre el esfuerzo y deformación unitaria. Lo más usual, es que el hormigón presente una combinación inicial elástico y posteriormente inelástico al aumentar el esfuerzo aplicado.

De acuerdo al procedimiento de la norma ASTM Designación: C 469 – 94 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in compression”, a continuación se muestran las gráficas esfuerzo – deformación para los hormigones convencionales y modificados con diferentes porcentajes de adición de polímero elástico, como se puede observar, no se puede evaluar la forma de la curvatura pasado el esfuerzo máximo, dado la imposibilidad de hacerlo con este método de ensayo.

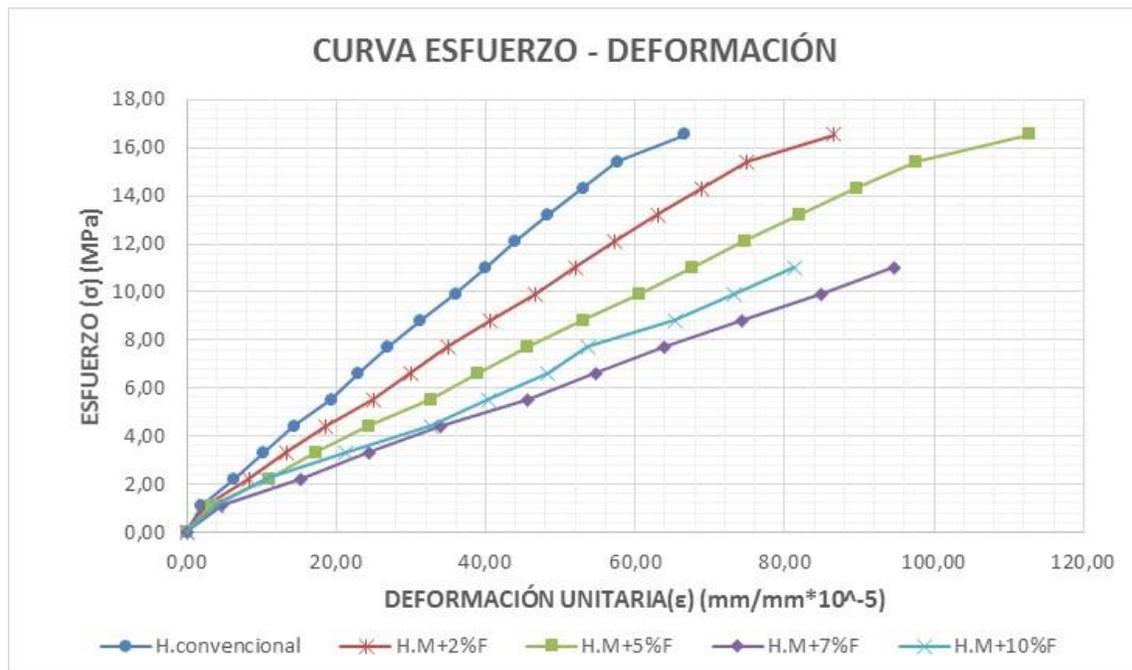


Ilustración 53.- Comparación de Curva esfuerzo-deformación de las mezclas. Primera etapa.

Las curvas esfuerzo – deformación unitaria obtenidas, muestran que a mayor adición de polímero elástico se tiene una línea tendida a menos inclinación en referencia al eje deformación unitaria, que obedece a un rango elástico más amplio, indicando que el hormigón se hace más dúctil con la inclusión del polímero elástico. Los hormigones modificados tienen mayor capacidad de deformación que los hormigones convencionales, lo que indica un menor módulo de elasticidad.



Ilustración 54.- Comparación de curva esfuerzo-deformación de las mezclas. Segunda etapa.

El hormigón modificado tiene una gran facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación de compresión inferior a la resistencia a compresión del hormigón.

Las probetas ensayadas soportaron cargas post-fractura y manifestaron desplazamientos significativos, los cuales son parcialmente recuperables. Así la masa de hormigón es capaz de soportar cargas aunque este fracturada.

Esto debido a que el polímero elástico tiene la habilidad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla.

La inclusión de polímero elástico elimina la falla catastrófica del hormigón reforzado. Esto se explica en base a que en el hormigón convencional, la primera grieta se propaga inmediatamente provocando una falla instantánea mientras que en los compuestos modificados, se mantiene ambos lados de la grieta juntos permitiendo que el material soporte parte de la carga a grandes deformaciones.

4.4.3. Resistencia a la tracción por compresión diametral.

Según las figuras siguientes se realiza un análisis comparativo de las resistencias obtenidas en los ensayos realizados que comprenden dos Etapas de ensayos: la primera que contiene pruebas de resistencias de Hormigón convencional y Hormigón modificado (adición polímero

elástico 2, 5, 7, 10 % en relación al agregado fino); una segunda etapa en la que también se evalúa la resistencia del hormigón convencional además de un hormigón modificado (sustitución del 2% de Polímero elástico correspondiente al agregado grueso).

4.4.3.1. Análisis de Resultados.

El presente grafico comparativo corresponde a las resistencias promedio tanto del hormigón convencional y modificado de la primera etapa; en el cual la que presenta mayor ventaja es el hormigón convencional.

No obstante se puede apreciar que mientras mayor aumento hay del porcentaje de polímero elástico en dosificación convencional la tendencia es que la resistencia siga disminuyendo.

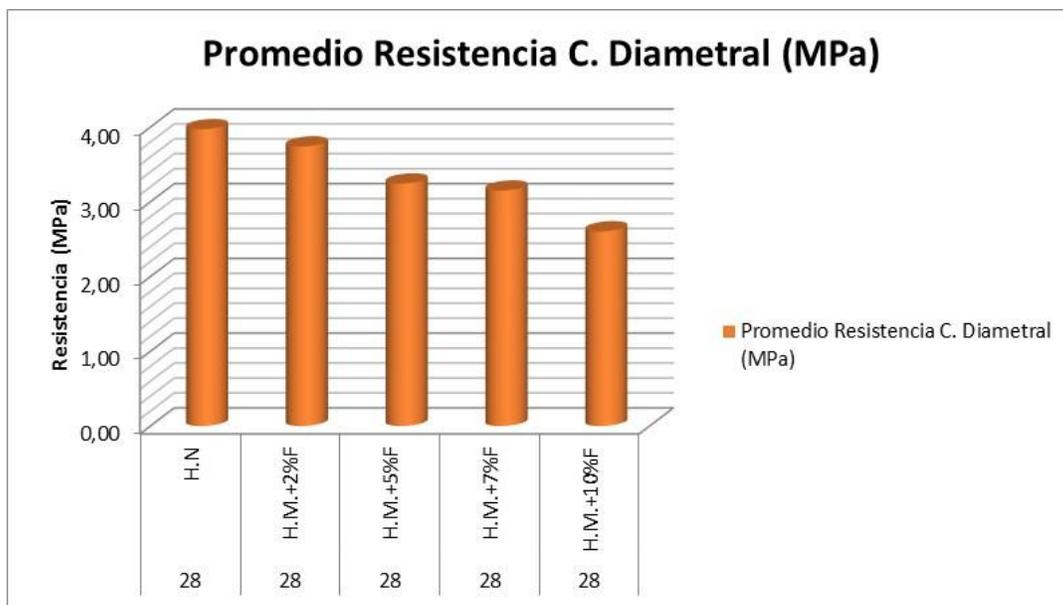


Ilustración 55.- Promedio de resultados C. Diametral 1 Etapa.

En la segunda etapa se procede a ensayar las muestras que corresponden a hormigón convencional a la vez del hormigón modificado restituido el polímero elástico en relación al agregado grueso, presentando los siguientes resultados.

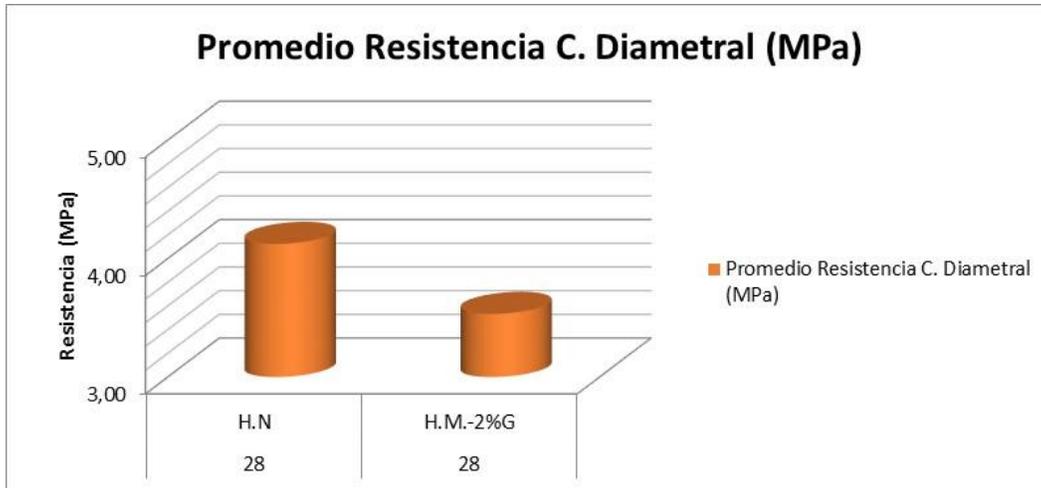


Ilustración 56.- Promedio de resultados C. Diametral 2 Etapa.

A continuación se presenta un resumen general de los resultados de ambas etapas, es notable que la resistencia de un hormigón convencional a los 28 días es mucho mayor que las resistencias al hormigón modificado. Los valores de la resistencia a la tracción presentan un comportamiento análogo al de la resistencia a la compresión, puesto que el polímero afecta de manera similar a ambas propiedades. También la disminución de la resistencia a la tracción se debe a un incremento en el contenido de aire con la adición de polímero elástico, así como a la existencia de enlaces débiles entre la pasta de cemento y el polímero recuperado.

Para los siguientes ensayos se diseñaron proporciones similares de los agregados componentes del hormigón para ambas etapas para que no exista variación, por causas climatológicas, tiempo de fraguado, contenido de humedad de los agregados.

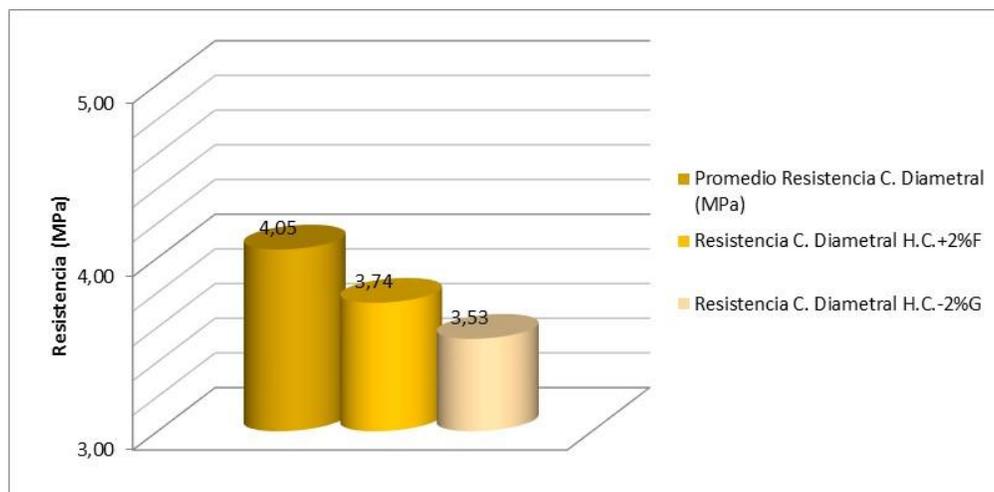


Ilustración 57.- Promedio de resultados C. Diametral 1 y 2 Etapa.

4.4.4. Resistencia a la flexión (Vigas).

Según las figuras siguientes se realiza un análisis comparativo de las resistencias obtenidas en los ensayos realizados que comprenden dos Etapas de ensayos: la primera que contiene pruebas de resistencias de Hormigón Convencional y hormigón Modificado (adición polímero elástico 2, 5, 7, 10 % en relación al agregado fino); una segunda etapa en la que también se evalúa la resistencia del hormigón convencional además de un hormigón modificado (sustitución del 2% de Polímero elástico correspondiente al agregado grueso). Al mismo tiempo se verifica los resultados de los diseños de hormigón modificado añadido el polímero elástico en un 2 %, pues que este es el rango de mejor comportamiento el cual se establece según los ensayos efectuados en la primera etapa.

4.4.4.1. Análisis de Resultados.

El presente grafico comparativo corresponde a las resistencias promedio tanto del hormigón convencional y modificado dela primera etapa; mediante el cual podemos constatar que este es la propiedad en la cual podemos obtener beneficios en el aporte de este nuevo material constituyente del hormigón convencional.

Al añadir el porcentaje de polímero elástico en el hormigón convencional en un porcentaje del 2% respecto del agregado fino, es notable que la resistencia a la flexión en este método de ensayo directo establecido por las normas NTE INEN 2554 es mayor al diseño de hormigón convencional. Porque las vigas de hormigón modificado en su totalidad fallaron en el tercio medio y las fibras a compresión se acortan mientras que las fibras más traccionadas se alargan. La adherencia del polímero elástico a la matriz de concreto es buena, pero el polímero no es suficientemente fuerte para mitigar la fractura principal, sin embargo es suficiente para controlar o mantener ambos lados de las grietas juntas para que no ocurra un desprendimiento de la matriz del concreto, permitiendo que soporte mayor módulo de rotura que el convencional.

No obstante se puede apreciar que mientras mayor aumento hay del porcentaje de polímero elástico en el diseño del hormigón convencional la tendencia es que la resistencia representa un decrecimiento.

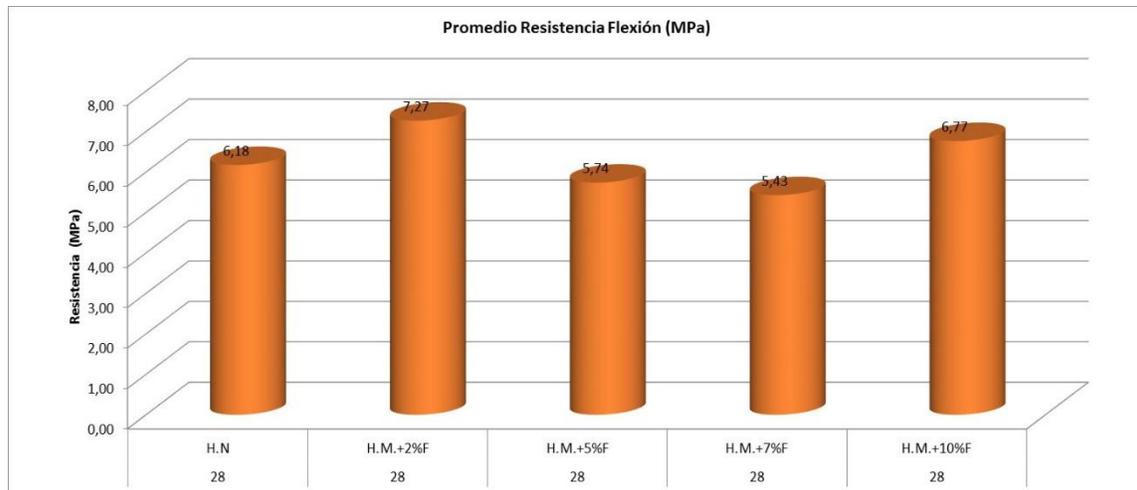


Ilustración 58.- Resumen de Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 1 etapa.

En la gráfica puede observarse los resultados de la resistencia a la flexión para definir el porcentaje que mejor se comporta al presente ensayo, ya que en los ensayos de la primera etapa coexisten dos datos especiales a tomar en cuenta. Estos datos correspondientes a las mezclas de los porcentajes de adición del 2 y 10 % del polímero elástico, resultados que están por encima del hormigón convencional.

Para los porcentajes de diseño del 5 y del 7% del hormigón modificado los resultados son evidentemente menores al hormigón convencional y modificado (adición 2 % polímero elástico), pero en los resultados del hormigón modificado (adición 10 % polímero elástico) la resistencia a la flexión de los especímenes experimenta una variación de los resultados según la tendencia a decrecer, provocando un aumento de la resistencia. Causa por la cual se elabora otros especímenes para verificar los resultados antes descritos.

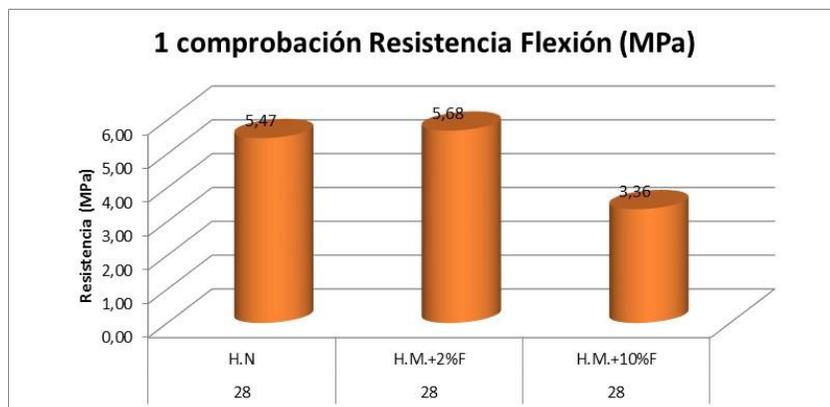


Ilustración 59.- Comprobación de resultados (Segunda etapa).

Con los resultados del siguiente ensayo se observa que las presunciones que el hormigón modificado (H.M.+10%F), presenta un aumento en su resistencia queda definido que por motivos de pre mezcla, pos mezcla, condiciones del curado y condiciones climáticas.

En la segunda etapa se procede a ensayar las muestras que corresponden a hormigón convencional a la vez del hormigón modificado restituído el polímero elástico en relación al agregado grueso, presentando los siguientes resultados.

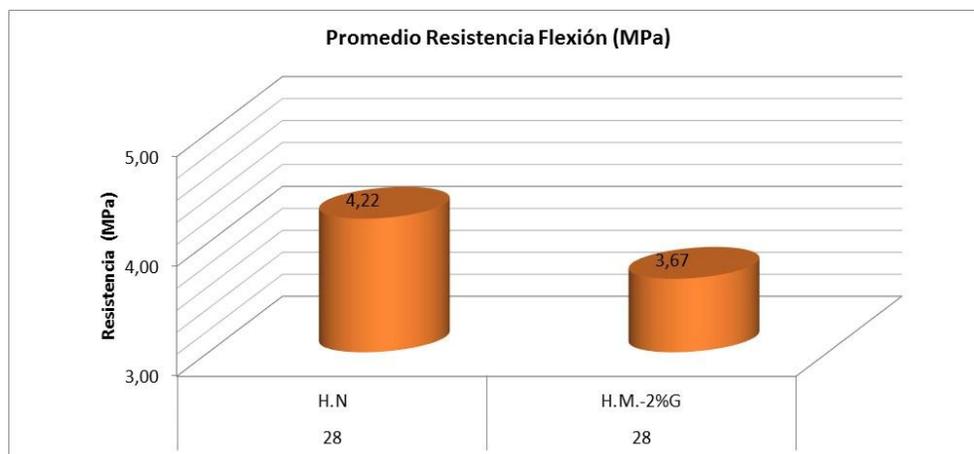


Ilustración 60.- Resultados de sustitución Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 2 etapa.

El valor de flexión a vigas que presenta una ventaja en su capacidad soportante es a la cual se añade polímero elástico al hormigón convencional, en el porcentaje del 2% de acuerdo al agregado fino, motivo por lo cual hacemos mayor hincapié en los resultados de tales ensayos. La razón para añadir polímero elástico con respecto al agregado fino, fue porque en la dosificación del hormigón, el agregado fino compone del 44% de la mezcla en cambio el agregado grueso el 56 %. Por lo cual se debió añadir con relación al componente con menor porcentaje, para minimizar las desventajas producidas en las propiedades mecánicas cuando se añade mayor cantidad de caucho.

Las fibras de polímero elástico le dan al hormigón capacidad de cohesión⁸, observándose que aun fracturada la viga, el polímero sigue adherida a la matriz del concreto hasta que se separan los dos fragmentos de la viga por la acción de la presión.

⁸ La cohesión es distinta de la adhesión. La cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos.

En la gráfica puede observarse los resultados que reafirman los datos obtenidos en los ensayos correspondientes a la primera etapa.

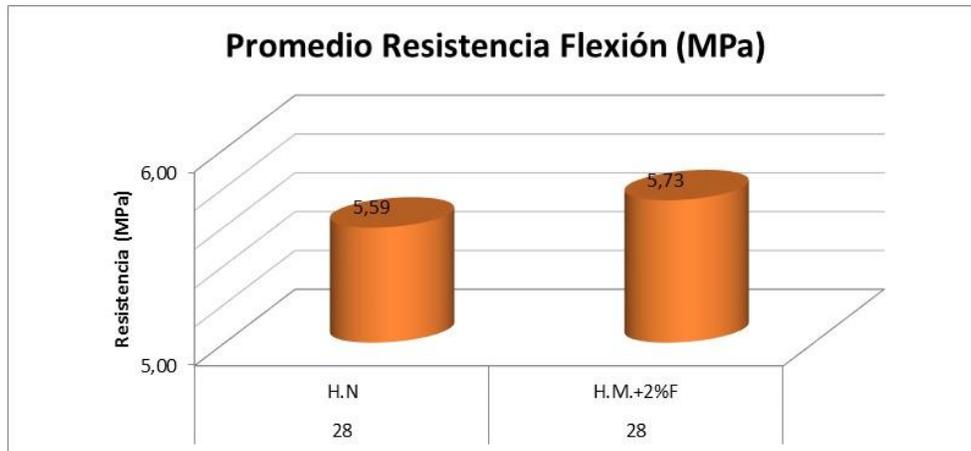


Ilustración 61.- Comprobación de resultados Resistencia a flexión Hormigón convencional y modificado 2 etapa.

4.4.5. Densidad, Absorción y Porosidad

Según las figuras siguientes se realiza un análisis comparativo de las resistencias obtenidas en los ensayos realizados que comprenden dos Etapas de ensayos: la primera que contiene ensayos de densidad, absorción y porosidad del Hormigón Convencional y hormigón Modificado (adición Polímero elástico 2, 5, 7, 10 %) en relación al agregado fino; una segunda etapa en la que también se evalúa de densidad, absorción y porosidad del hormigón convencional además de un hormigón modificado (Sustitución del 2% de Polímero elástico correspondiente al agregado grueso). Al mismo tiempo se verifica los resultados de los diseños de hormigón modificado añadido el polímero elástico en un 2 %, pues que este es el rango de mejor comportamiento el cual se establece según los ensayos efectuados en la primera etapa.

4.4.5.1. Análisis de Resultados.

El presente gráfico comparativo corresponde a densidad, absorción y porosidad tanto del hormigón convencional y modificado de la primera etapa; mediante el que podemos constatar que esta es la propiedad en la cual podemos obtener beneficios en el aporte de este nuevo material constituyente del hormigón convencional.

Al añadir el porcentaje de polímero elástico en el hormigón convencional en un porcentaje del 2% respecto del agregado fino, es notable que la densidad establecida por las normas ASTM C 642 es menor al diseño de hormigón convencional.

No obstante se puede apreciar que mientras mayor aumento hay del porcentaje de polímero elástico en el diseño del hormigón convencional la tendencia es que las densidades representa un crecimiento. Resultados que no traen consigo beneficios a la presente investigación.

En la aplicación en elementos estructurales del hormigón modificado $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, aporta de manera sustancial al tener una carga menor que el hormigón convencional.

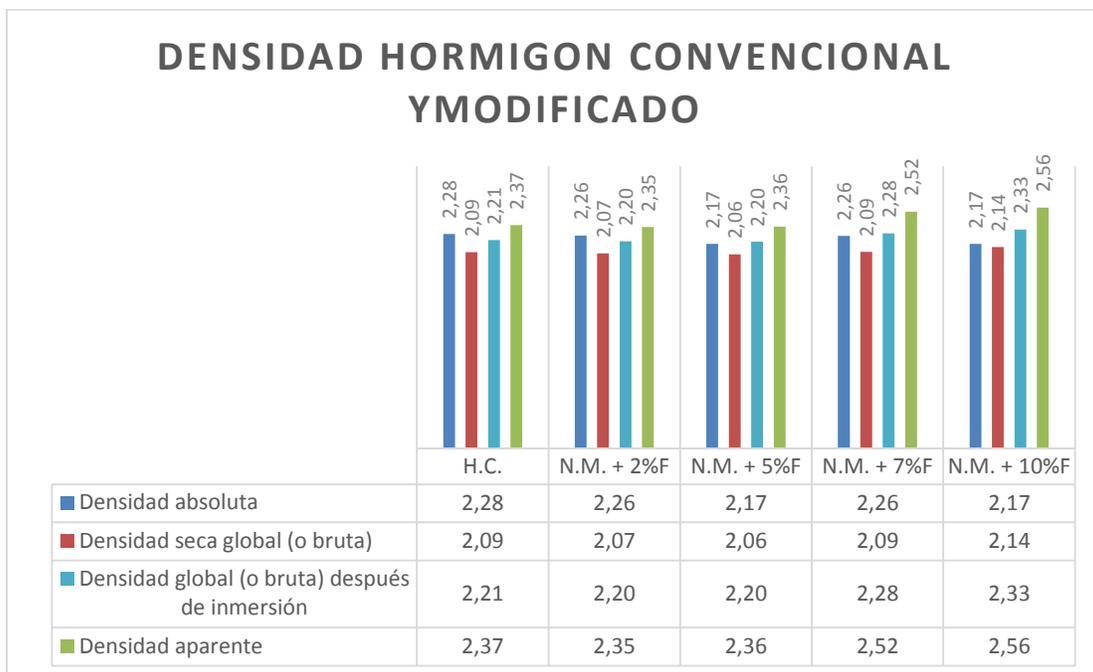


Ilustración 62.- Resumen de Densidades Hormigón convencional y modificado 1 etapa.

En las gráficas siguientes no tiene mayor incidencia los resultados obtenidos ya que al mayor aporte del polímero elástico al hormigón convencional cambian a las propiedades subsiguientes como la absorción y porosidad. Dando resultados mayores, con esto son más propensos a la absorción de líquidos y por consiguiente tiene mayor porosidad (espacios vacíos).

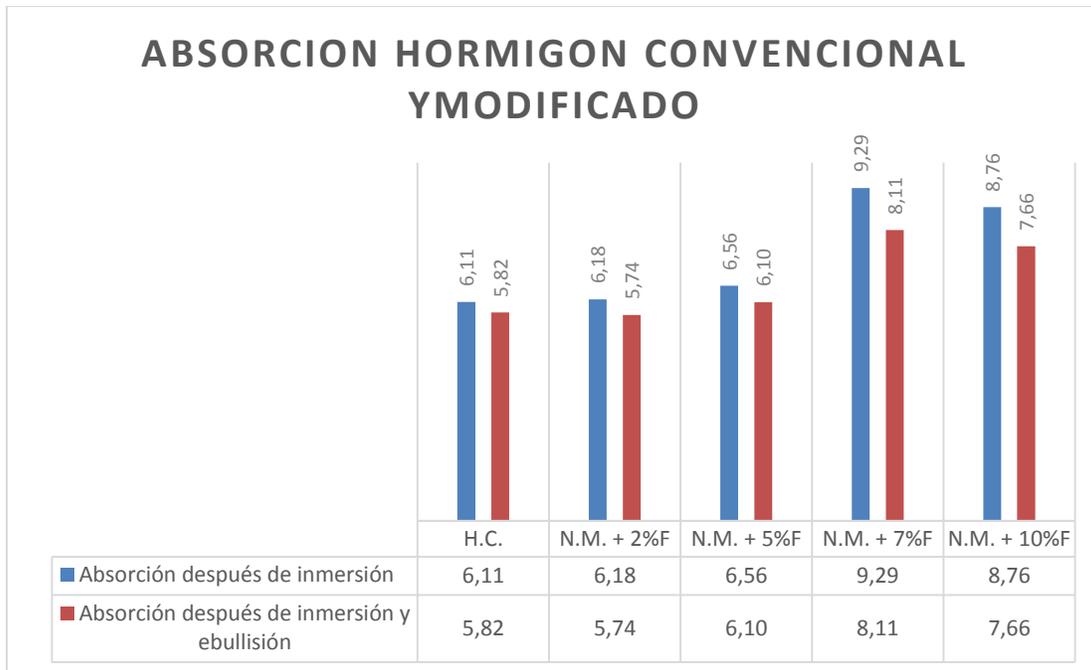


Ilustración 63.- Resumen de Absorción Hormigón convencional y modificado 1 etapa.

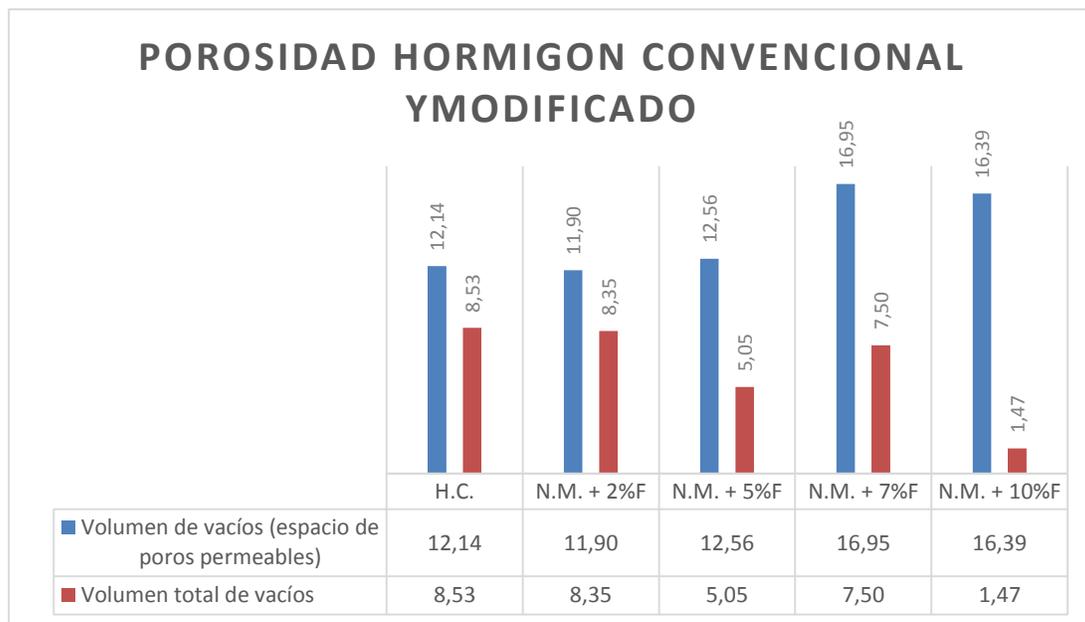


Ilustración 64.- Resumen de Porosidad Hormigón convencional y modificado 1 etapa.

Para los porcentajes de diseño del 2% del hormigón modificado (sustitución) los resultados son evidentemente menores al hormigón convencional, por lo cual también se podría realizar

hormigones con este diseño pero modificaría las demás propiedades que son más elementales al decidir el uso del hormigón estructural.

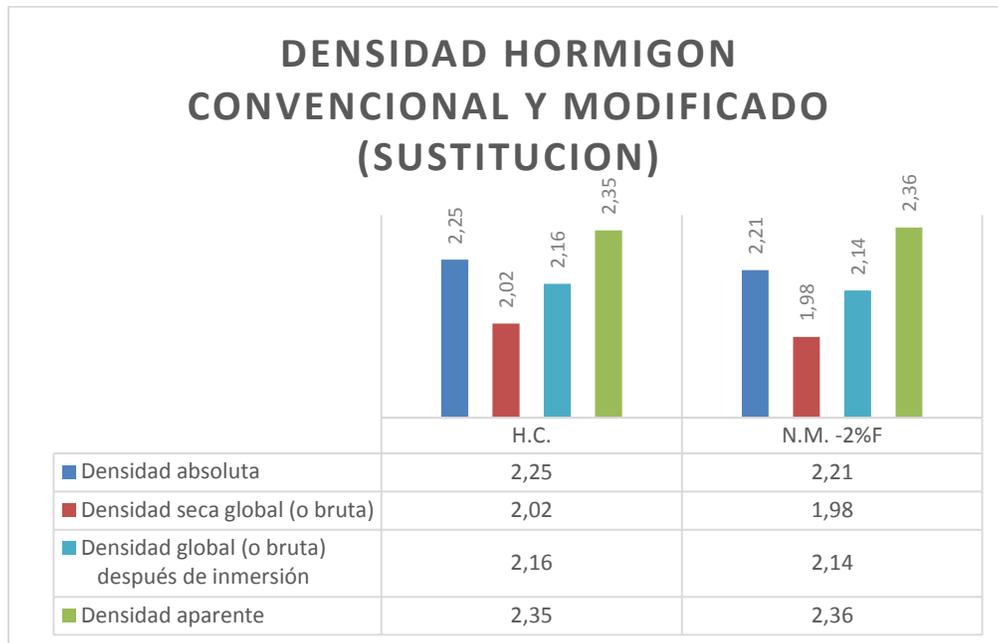


Ilustración 65.- Resumen de Densidades del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).

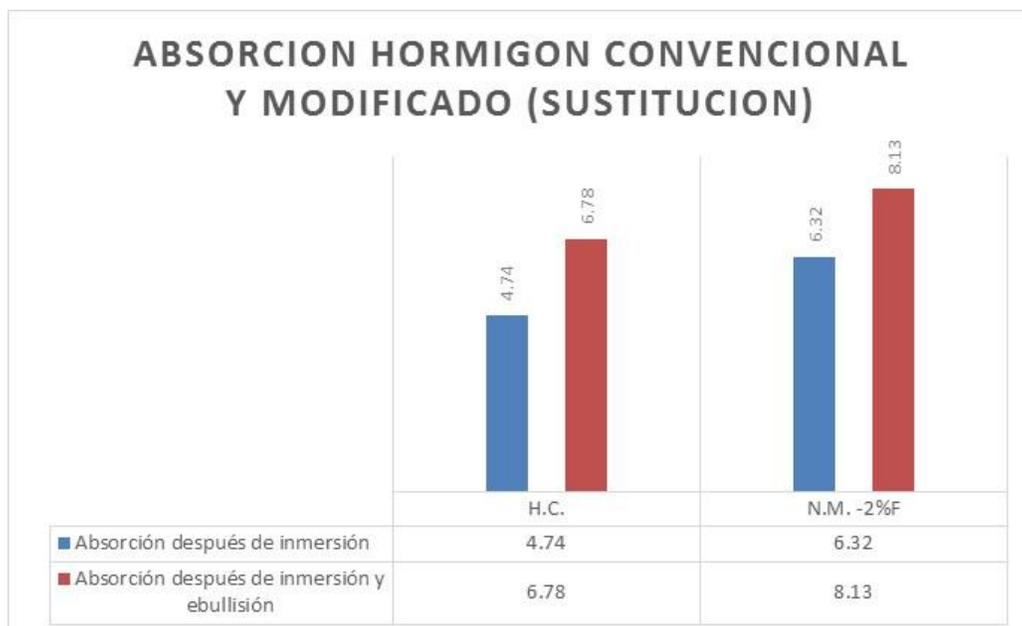


Ilustración 66.- Resumen de Absorción del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).

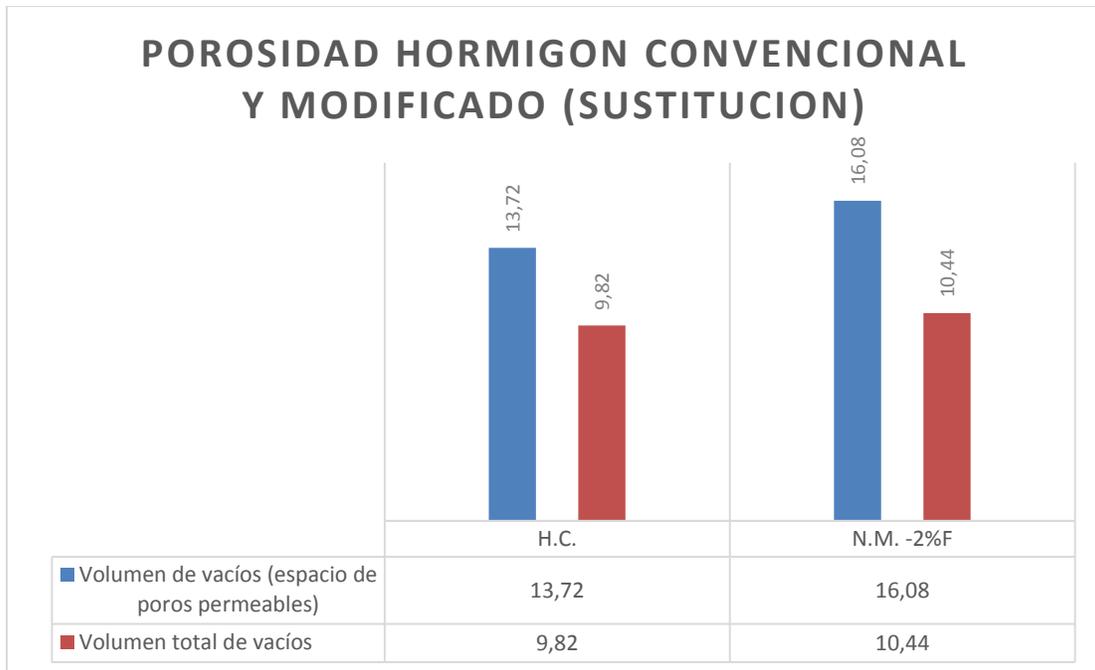


Ilustración 67.- Resumen de Porosidad del Hormigón convencional y modificado (2 etapa).

4.4.6. Adherencia entre hormigón – acero sometidos a cargas.

El ensayo consistió en extraer una barra de acero previamente embebida en una probeta de hormigón, y determinar el esfuerzo producido en la longitud de adherencia. A continuación un resumen del esfuerzo de adherencia en las diferentes mezclas, con su respectivo porcentaje de variación:

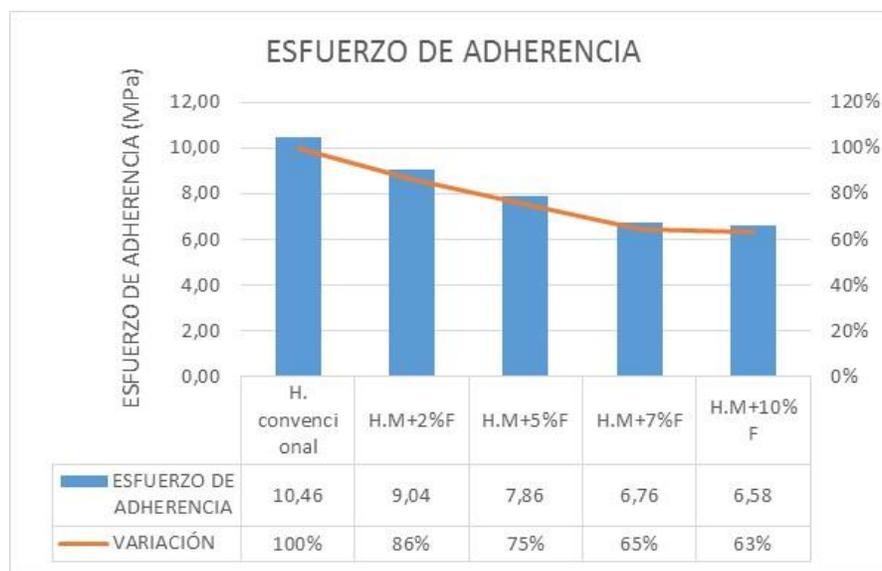


Ilustración 68.- Esfuerzo de adherencia en relación a la variación. Primera etapa.

Los modelos de ensayo de adherencia, fueron caracterizados por la falla por deslizamiento en los prismas de concreto con las barras de acero.

La adición de los diferentes porcentajes de polímero elástico reduce la capacidad del esfuerzo de adherencia respecto al hormigón convencional. Existe una variación del 14, 11, 11, 2% respecto al hormigón convencional, para cada porcentaje de adición del polímero elástico (2, 5, 7, 10%) respectivamente.

Se verificó que la resistencia a la compresión del hormigón y el diámetro de las barras de acero tienen influencia en el resultado de la resistencia a la adherencia. Cuanto mayor la resistencia a la compresión del concreto mayor la resistencia de adherencia.

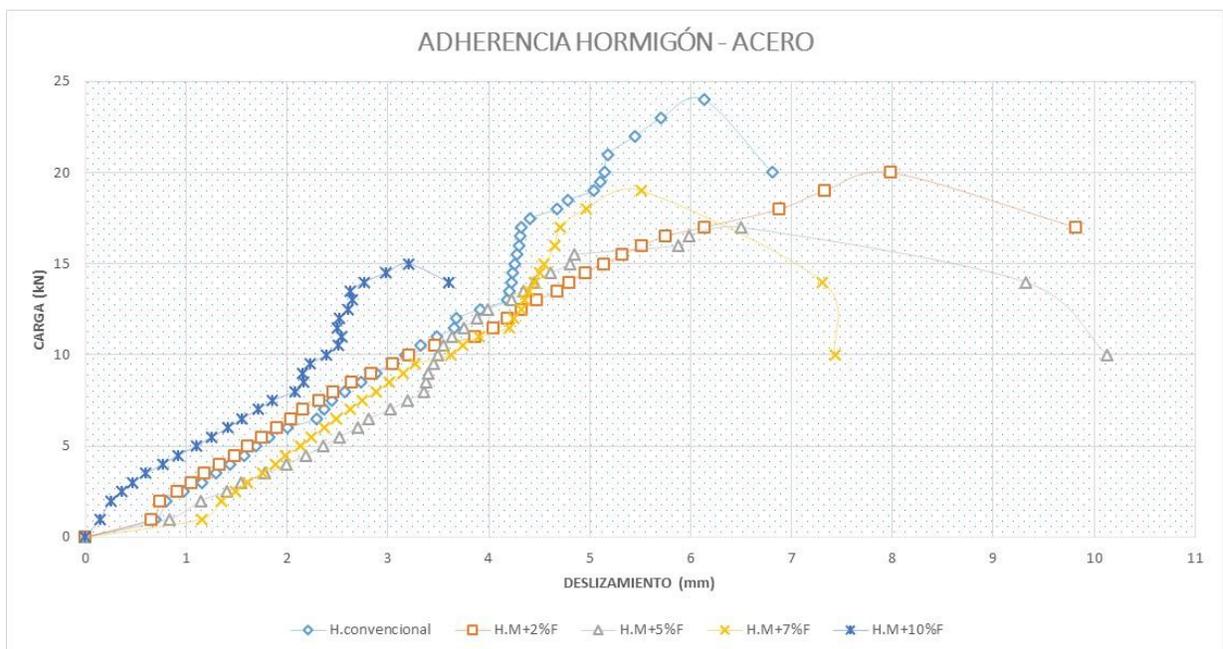


Ilustración 69.- Relación entre la carga aplicada vs. El deslizamiento producido. Primera etapa

Como se muestra en la ilustración el deslizamiento por adherencia del hormigón modificado, aumenta, respecto al hormigón convencional, esto se debe a la geometría y textura del polímero elástico. El hormigón modificado con el 2, 5% del polímero elástico, presentó mejor comportamiento de resistencia a la adherencia en relación al hormigón convencional.

Tabla 41.- Carga máxima y deslizamiento producido en las diferentes mezclas.

MEZCLAS	CARGA MÁXIMA (kN)	DESLIZAMIENTO MÁXIMO (mm)
H. convencional	24,00	6,13
H.M+2%F	20,00	7,98
H.M+5%F	17,00	6,50
H.M+7%F	19,00	5,51
H.M+10%F	15,00	3,20

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán

Para las probetas de hormigón con barras de acero de 10 mm la resistencia de adherencia del hormigón modificado, con los diferentes porcentajes de adición del polímero elástico, fue mayor que para el hormigón convencional. El hormigón convencional tiene cargas últimas obtenidas mayores en relación al hormigón modificado, pero menor capacidad de deslizamiento.

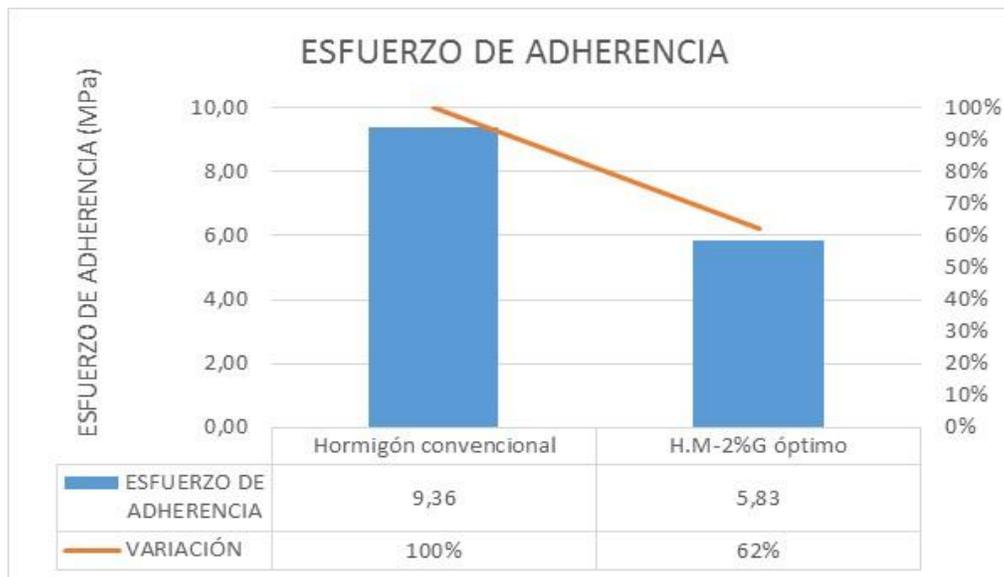


Ilustración 70.- Esfuerzo de adherencia en relación a la variación. Segunda etapa

Igual que en la primera etapa las probetas fallan por deslizamiento de las varillas. En el hormigón modificado se reduce la cantidad del agregado grueso con respecto al porcentaje óptimo del polímero elástico. El hormigón modificado tiene una reducción del 38% en el esfuerzo de adherencia con relación al hormigón convencional.

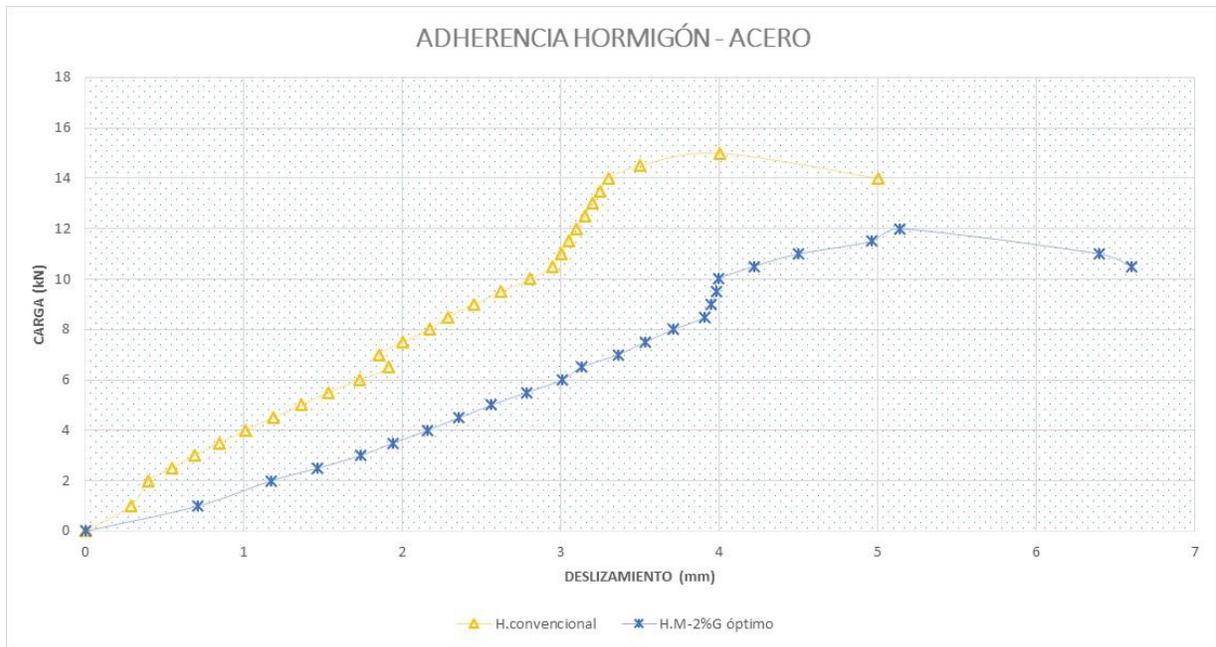


Ilustración 71.- Relación entre la carga aplicada vs. El deslizamiento producido. Segunda etapa

Como se muestra en la ilustración el deslizamiento por adherencia del hormigón modificado, aumenta, respecto al hormigón convencional.

En comparación a la primera etapa en la cual se adicionó polímero elástico con respecto al agregado fino, presenta mayor capacidad de deslizamiento.

Tabla 42.- Carga máxima y deslizamiento producido en las diferentes mezclas.

MEZCLAS	CARGA MAXIMA (kN)	DESLIZAMIENTO MÁXIMO (mm)
H. convencional	15,00	4,00
H.M-2%G óptimo	12,00	5,14

Fuente: Luis Pilamunga y Raúl Guamán.

La carga última obtenida en el hormigón modificado con el porcentaje óptimo de polímero elástico es menor en relación al hormigón convencional. Pero tiene mayor capacidad de deslizamiento.

4.4.7. Consideraciones económicas.

Para las consideraciones económicas se realiza un análisis de precios unitarios de los materiales empleados tanto para el hormigón convencional como para el hormigón modificado. El material en la presente investigación es procedente de la mina Cerro Negro, está muy cercana a la ciudad de Riobamba por tanto el transporte del material tiene un costo menor. Se opta por la utilización de este material por presentar una buena calidad, constructores y todos aquellos gremios afines a la construcción referencian la utilización de estos materiales. Se presenta el resumen del costo total de materiales empleados en la presente investigación.

Tabla 43.- Costo total de materiales utilizados en la investigación

COSTO TOTAL DE MATERIALES				
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	P.U(\$)	P.TOTAL(\$)
Hormigón Convencional Etapa 1 y 2	M3	0,452	80,73	36,50
Hormigón Modificado Etapa 1 y 2	M3	1,109	93,39	103,54

Tabla 44.- Costo m3 hormigón convencional.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Hormigón CONVENCIONAL 1 M3					
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Arena Agregado fino Cerro Negro	M3	1,00	8,00	8,00
2	Ripio Agregado Grueso Cerro Negro	M3	1,00	10,00	10,00
3	Cemento portland IP-Chimborazo	kg	428,63	0,145	62,15
4	Agua Tanquero P. e = 1000kg/m3	kg	232,32	0,0025	0,5808
	Total materiales				80,73
	Total Precio Unitario de 1 m3 Hormigón Convencional				80,73

Tabla 45.- Costo m3 hormigón modificado.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Hormigón MODIFICADO 1 M3					
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Arena Agregado fino Cerro Negro	m3	1,00	8,00	8,00
2	Ripio Agregado Grueso Cerro Negro	m3	1,00	10,00	10,00
3	Cemento portland IP-Chimborazo	kg	428,26	0,145	62,10
4	Agua Tanquero P. e = 1000kg/m3	kg	231,85	0,0025	0,58
5	Polímero Elástico	kg	15,25	0,833	12,71
	Total materiales				93,39
	Total Precio Unitario de 1 m3 Hormigón Modificado				93,39

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Culminando el presente trabajo de investigación, se puede concluir que se logró alcanzar todos los objetivos propuestos en el lapso de tiempo establecido al comienzo del proyecto:

- Se ha cumplido con el objetivo planteado en este documento, que consistió en obtener un hormigón modificado $f'c=28$ MPa por medio de la adición de polímero elástico, además de la determinación de las diferentes propiedades de ambos diseños, con lo cual el estudio de la utilización de fibras de polímero elástico de neumáticos reciclados en la elaboración de hormigones, sirven como alternativa de mitigación al impacto ambiental, para lo que se obtuvieron resultados que servirán de iniciativa para posteriores investigaciones.
- En los ensayos mecánicos después del fraguado, las roturas eran distintas dependiendo de la mezcla, ya que cuando las probetas no contenían polímero elástico producían un ruido estruendoso, lo que no sucedía con las muestras con adición del polímero. Esto se debe a que los especímenes con polímero mostraban una alta capacidad para absorber energía plástica.
- Posterior al agrietamiento de las probetas del hormigón modificado, las partes se mantienen juntas permitiendo que el material soporte grandes deformaciones. Con la adición del polímero elástico se logra que el hormigón trabaje en la zona elástica, permitiendo deformarse aun después de haberse fisurado, lo que mejora su ductilidad.
- Al adicionar los diferentes porcentajes del polímero elástico en el hormigón modificado, el peso específico del hormigón se reduce, esto debido a la baja densidad del polímero elástico. La densidad es claramente disminuida en 0.77, 1.00, 0.62 y 1.08 % para el 2, 5, 7, 10% de adición del polímero respectivamente con relación al hormigón convencional.

DESCRIPCIÓN	DENSIDAD
	kg/m³
Hormigón convencional	2245
H. con 2% polímero	2227
H. con 5% polímero	2205
H. con 7% polímero	2191
H. con 10% polímero	2167

- El comportamiento antes del fraguado del hormigón modificado con adición de polímero, presenta una reducción en la manejabilidad medida en términos del asentamiento, la disminución es progresiva aproximadamente 2,25 cm para cada porcentaje de adición.
- El módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje del polímero elástico, ya que se está sustituyendo el árido convencional por un material mucho más elástico. El hormigón con caucho tiene una gran facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación de compresión inferior a la resistencia a compresión del hormigón.
- Después de analizar los resultados del hormigón modificado de la primera etapa, la cual consistía en la adición de diferentes porcentajes de polímero elástico (2, 5, 7, 10%) con respecto al agregado fino. Determinamos que el porcentaje óptimo es el 2% de polímero, la cual presenta mayores beneficios en relación al hormigón convencional.
- El esfuerzo de adherencia entre hormigón – acero, presenta una reducción aproximadamente del 14%, con respecto al hormigón convencional para cada porcentaje de adición del polímero. También en la relación carga vs. Deslizamiento se observó que el hormigón convencional tiene menor capacidad de deslizar en relación al hormigón modificado.
- El hormigón modificado de la primera etapa con la adición del 2% del polímero elástico, presentó mejor comportamiento de resistencia a la adherencia en relación al hormigón modificado de la segunda etapa. Porque la incorporación de polímero elástico favorece la aparición de aire en el estado fresco del hormigón, debido a la baja adherencia entre los polímeros y la pasta de cemento. Como consecuencia directa de esta baja adherencia, con lo cual los hormigones ofrecen una mayor absorción y porosidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una investigación mejorando la superficie del polímero elástico haciéndola más rugosa, para que de esta manera mejore la adherencia polímero-cemento hidratado y así evitar que la resistencia disminuya significativamente.
- Realizar mayor énfasis en el estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del polímero elástico.
- Elaborar un estudio con referencia a la cantidad de neumáticos reciclados anuales, en la provincia de Chimborazo.
- Es necesario contar con el equipo para la trituración mecánica de los neumáticos reciclados, para producir la materia prima (polímero elástico), lo cual beneficiara en el costo de producción del hormigón.
- Se debe elaborar las mezclas en similares: proporciones de los componente, condición de tiempo y espacio. Con el objetivo de comparar el hormigón convencional y modificado.

CAPÍTULO VI

6. PROPUESTA

6.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA

REDUCCIÓN EN EL COSTO DE PRODUCCIÓN DEL PAVIMENTO RIGIDO, MEDIANTE LA ADICIÓN DE POLÍMERO ELÁSTICO.

6.2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tema de la contaminación ambiental causa gran preocupación debido al aumento significativo de ésta, ocasionado en gran medida por la generación de residuos sólidos urbanos, tales como los neumáticos fuera de uso, ya que al realizar un producto y ponerlo al consumo humano este producto terminará siendo un residuo del cual se requiere una adecuada disposición. El desarrollo económico debe estar íntimamente ligado a la sostenibilidad, y ésta, a la reutilización de materiales que ahora son vistos como desperdicio. La sostenibilidad se debe evaluar bajo los tres aspectos siguientes: técnica y económica, ecológica y social.

Actualmente los neumáticos generados se arroja en rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, ríos y algunas fuentes de agua o son incinerados; causando un grave daño ambiental ya que lo neumáticos se demoran más de 500 años en ser descompuestos si son depositados en botaderos o rellenos sanitarios; contaminan las fuentes de agua si son arrojados en estas, o contaminan la atmosfera al ser incinerados ya que en muchas ocasiones algunos residuos pueden generar gases tóxicos.

Por otro lado, debido al deterioro que sufren actualmente los pavimentos, especialmente por fatiga, que inducen a la desintegración del pavimento y el fracturamiento de la losa en grietas transversales, longitudinales, de esquina y de bloque, lo cual hace necesario un diseño más apropiado y realista del comportamiento a la fatiga del concreto. Las nuevas tecnologías de pavimentos deberán estar orientadas a lograr nuevas redes de infraestructura vial que respondan eficientemente con el uso de materiales reciclables u otros que permitan construcciones sostenibles.

La adición de polímero elástico en el concreto, a pesar de que no aportan resistencia a compresión, poseen una buena resistencia a flexión, siendo el porcentaje óptimo de adición el 2%, dicha adición puede considerarse cuando se requieran pavimentos económicos como en vías rurales, locales de bajo tráfico o estacionamientos. Ya que el Módulo de rotura del concreto, es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.

La incorporación del polímero elástico (trituration de neumáticos) a los pavimentos ha sido estudiada en varios países del mundo como Estados Unidos, Inglaterra, Brasil, México, Venezuela entre otros. Esta modificación genera ganancias en los espesores del pavimento y de manera que los costos asociados disminuyen proporcionalmente con el espesor.

Desde hace tiempo se viene hablando de la reutilización de los neumáticos fuera de uso, para tratar de minimizar el gran problema de acopios que existe en el mundo. El concepto de Desarrollo Sostenible, tan en boga hoy en día, exige que toda la sociedad se concientice de la necesidad de aprovechar al máximo los recursos disponibles, intentando minimizar la generación de residuos.

Se busca reutilizar el polímero elástico de los neumáticos fuera de uso; incorporándolos al hormigón del pavimento rígido ya que según investigaciones anteriores se observa una mejoría en sus propiedades mecánicas, además de contribuir a la reutilización de los desechos. También tiene por objeto realizar el diseño del pavimento rígido con hormigón convencional y modificado, en base a los resultados logrados en el laboratorio.

En efecto en la presente propuesta, se logrará diseñar un pavimento rígido con el hormigón modificado aplicando el método AASHTO 1993, para comparar el desempeño de estos contra pavimento de hormigón convencional, logrando una reducción importante en el costo de producción del pavimento. Con lo cual se prevé la disminución del impacto ambiental y al mismo tiempo mejorar la calidad del pavimento.

6.3. OBJETIVOS

6.3.1. Objetivo General.

- Comparar el costo de producción del pavimento rígido con hormigón convencional y modificado.

6.3.2. Objetivos Específicos.

- Establecer los parámetros requeridos para el diseño de un pavimento rígido.
- Diseñar el pavimento rígido por el método AASHTO.
- Calcular el acero transversal (barras de amarre) y longitudinal (pasadores) en las juntas.
- Cuantificar los materiales que componen el pavimento rígido.
- Análisis comparativos de costos.

6.4. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO –TÉCNICA

6.4.1. Definición de los pavimentos.

Los pavimentos son físicamente un sistema multicapa, constituido por materiales cuyas características mecánicas son conocidas así como el espesor de cada capa. Las capas sirven para disipar las cargas recibidas por el tránsito y lograr que el suelo reciba cargas más pequeñas, debido a esto las capas superiores poseen mayor capacidad portante que las inferiores. Existen dos tipos principales de pavimentos, que son: Los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles.



Ilustración 72.- Estructura del pavimento.

Dentro de un pavimento cada capa cumple una función específica, tales como base, sub base, subrasante y la capa de rodadura.

La capa de rodadura.- es la que recibe directamente las solicitaciones del tránsito absorbe esfuerzos tanto horizontales como verticales, además de esto debe ser impermeable ya que debe evitar el paso del agua hacia las capas inferiores. Las losas en el pavimento rígido componen el elemento estructural más importante de un pavimento y tiene como función principal proporcionar al tránsito una superficie estable, impermeable, uniforme que además soporte las cargas de los vehículos y absorba la mayor parte de los esfuerzos y transmitirlos a la base y sub-base en magnitudes acorde a su resistencia.

Para disminuir el ruido en carreteras existen varias alternativas, dependiendo del tipo de obra y conveniencia al utilizar un pavimento rígido de concreto hidráulico o uno flexible de concreto asfáltico. En opinión del ingeniero Rafael Limón, presidente de la Asociación Mexicana de Asfalto, los pavimentos rígidos de concreto hidráulico mejoran su desempeño al ser ranurados sobre la capa superficial, provocándoles un cierto nivel de grietas o rayas a cada 1.5 o 2 cm y a una profundidad de 2 o 3 mm que se convierten en zonas de no contacto con las llantas, que a la vez amortiguan cierto porcentaje de ruido. Por esa razón en muchos países se busca que los pavimentos de zonas urbanas tengan un alto contenido de vacíos, ya que entre más lisos sean causan mayor ruido. Otro aspecto a considerar es que las juntas de losa estén correctamente construidas; normalmente, en las losas se deben provocar grietas controladas de aproximadamente 3 cm.

En los últimos años se ha promovido el desarrollo de pavimento que sea sostenible y que respete el medio ambiente. En este sentido cabe mencionar la creación de pavimento que combina el asfalto con el polvo de caucho que se obtiene a partir de neumáticos reciclados y la utilización del producto conocido como noxer⁹, que tiene la capacidad de absorber la contaminación que producen los tubos de escape de los vehículos.

⁹ *NOxer: es un producto que aplicado sobre el asfalto ayuda a purificar el aire en entornos urbanos, tiene en su composición un compuesto químico llamado dióxido de titanio (TiO₂) que con la ayuda de los rayos ultravioletas del sol produce una reacción de fotocatalisis que transforma el óxido de nitrógeno en otras sustancias que quedan fijadas sobre el asfalto.*

En investigaciones anteriores se demuestra la viabilidad de las adiciones de caucho reciclado de neumáticos de camiones a los firmes de rodadura rígidos, contando con una base elástica de calidad. Las cantidades de caucho pueden variar hasta lo que se desee, entre unos límites razonables que se han establecido entre 3.5% y 5% en volumen. También se demuestra la compatibilidad entre el caucho y el hormigón, su mejora respecto de la fisuración por retracción y de disipación de energía elástica, lo que redundaría en una reducción del nivel sonoro del tráfico.

6.4.2. Requisitos para el comportamiento.

La resistencia del pavimento depende del suelo natural. Sin embargo, aunque a veces se utilizan por si solo como superficie de rodadura presenta algunas desventajas que exigen generalmente, cuando soporta niveles significativos de tránsito (mayores de 50 000 ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton durante el periodo de diseño), reforzarlo mediante una estructura que debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe resistir las cargas ocasionadas por el tráfico sin sufrir deformaciones permanentes.
- Tener una superficie apropiada al rodamiento y una superficie de rodadura antideslizante.
- Ser flexible.
- La superficie de la carretera debe resaltar sobre la noche y en tiempo de niebla.
- Seguridad para el usuario.
- Ser resistente a la acción del clima.
- Debe ser resistente al efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe ser durable.
- Debe ser económico.

6.4.3. Factores de Diseño.

Factores a considerar en el diseño de pavimentos:

- Tránsito
- Tipo de subrasante

- El clima
- Los materiales disponibles

6.4.3.1. Tránsito

Interesan para el dimensionamiento de los pavimentos las cargas más pesadas por eje (simple, tándem o tridem esperadas en el carril de diseño el más solicitado, que determinara la estructura del pavimento de la carretera), durante el periodo de diseño adoptado. La repetición de las cargas del tránsito y la consecuente acumulación de deformaciones sobre el pavimento son fundamentales para el cálculo. Además se deben tener en cuenta las máximas presiones de contacto, las sollicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración), las velocidades de operación de los vehículos.

Es necesario determinar el TPDA (tránsito promedio diario anual), que se define como el volumen total de vehículos que pasan por un punto o sección de una carretera en un periodo de tiempo determinado, que es mayor a de un día y menor o igual a un año, dividido por el número de días comprendido en dicho período de medición.

6.4.3.2. La subrasante

Es la capa de terreno natural que soporta la estructura del pavimento de una carretera debidamente compactado y nivelado, extendiéndose hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

Su objetivo es servir de soporte para el pavimento después de ser estabilizada, homogenizada y compactada. El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

En la preparación de la subrasante intervienen los siguientes aspectos:

- Compactación de los suelos que garanticen un apoyo uniforme y estable para el pavimento.

- Mejorar los suelos de muy baja calidad por medio de tratamientos mecánicos o químicos.

La capacidad del suelo se mide mediante las pruebas de CBR y Módulo de Resiliencia.

$$Mr \text{ (psi)} = 1500 \times \text{CBR}; \text{ para } \text{CBR} < 7.2\% \text{ sugerida por AASHTO.}$$

$$Mr \text{ (psi)} = 3000 \times \text{CBR}^{0.65}, \text{ Para materiales de sub-rasante con CBR mayor de } 7,2\% \text{ pero menor o igual a } 20,0\%$$

El CBR se expresa en porcentaje (%). Los valores del índice CBR oscilan entre 0 y 100. Cuanto mayor es su valor, mejor es la capacidad portante del suelo.

Tabla 46.- Variación del CBR.

CBR	CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DEL SUELO	USO
2 hasta 5	Muy mala	Subrasante
5 hasta 8	Mala	Subrasante
8 hasta 20	Regular - Buena	Subrasante
20 hasta 30	Excelente	Subrasante
30 hasta 60	Buena	Subrasante
60 hasta 80	Buena	Base
80 hasta 100	Excelente	Base

Fuente: FERNANDEZ, Luis; "ENSAYO CBR"; Curso 2006-2007.

En el caso en que las condiciones de la subrasante no son razonablemente uniformes, su mejoramiento se puede lograr mediante técnicas adecuadas de reparación de la subrasante, además se necesita prestar atención especial al control de los suelos expansivos y de los asentamientos diferenciales excesivos por hinchamiento debido a la congelación.

6.4.3.3. El clima

Los factores que en nuestro medio más afectan a un pavimento son las lluvias y los cambios de temperatura. Las lluvias por su acción directa en la elevación del nivel freático influyen en la resistencia, la comprensibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante especialmente. Los cambios de temperatura en las losas de pavimentos rígidos ocasionan esfuerzos muy elevados, que en algunos casos pueden ser superiores a los generados por las cargas de los vehículos que circulan en ellas.

6.4.3.4. Los materiales disponibles

Los materiales disponibles son determinantes para la selección de la estructura de pavimento debiendo ser la más adecuada, técnica y económica. Por una parte se consideran los agregados disponibles en canteras y depósitos del área, además de la calidad requerida hay que atender al volumen disponible, aprovechable y el costo, considerando una buena medida por la distancia de acarreo. El análisis de los costos de construcción debe complementarse con una prevención del comportamiento del pavimento durante el período de diseño, la conservación necesaria y su costo actualizado.

6.4.4. Pavimento rígido o hidráulico.

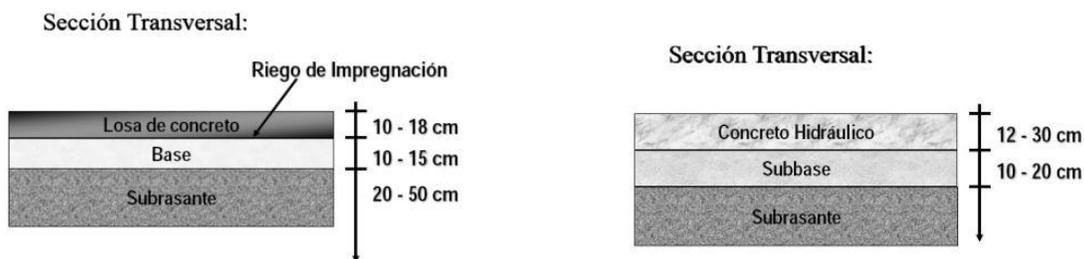


Ilustración 73.- Secciones donde se pueden apreciar las capas del firme rígido.

Un pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o Sub-base. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas y por eventos emergentes.

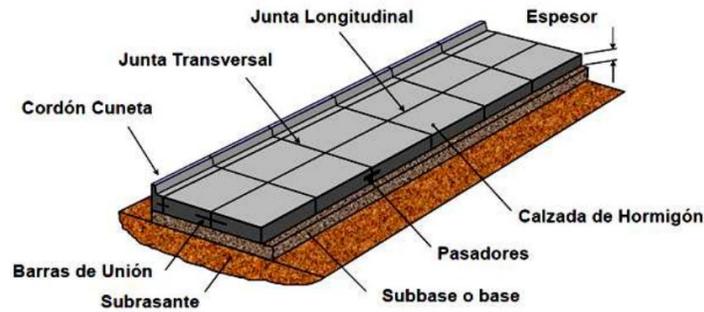


Ilustración 74.- Componentes principales del sistema.

La resistencia del hormigón para el pavimento deberá estar conforme a los requerimientos del diseño, constantes en las cláusulas del contrato; con las siguientes limitaciones según el caso:

Resistencia especificada a la flexión en el ensayo de carga sobre tres puntos en una viga de 15 x 15 x 50 cm.: M.R. no menor a 4 MPa.

Resistencia especificada a la compresión en cilindros de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura: $f'c$ no menor de 28 MPa. (MOP-001-F, 2002)

Los pavimentos rígidos o hidráulicos como se les conoce también, defieren de los pavimentos de asfalto o flexibles, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven considerablemente afectados por los cambios de temperatura. Los pavimentos rígidos están sujetos a los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- Esfuerzos de tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de tensión causados por la expansión, contracción del concreto y por efectos de los cambios de temperatura.



Ilustración 75.- Pavimento rígido en planta.

6.4.4.1. Tipos de pavimento de concreto

Los diversos tipos de pavimentos de concreto pueden ser clasificados, en orden de menor a mayor costo inicial, de la siguiente manera:

- a) Pavimentos de concreto simple.
 - ❖ Sin pasadores.
 - ❖ Con pasadores.
- b) Pavimentos de concreto reforzado con juntas.
- c) Pavimentos de concreto con refuerzo continuo.

Destacando que en todos ellos, que de la losa de concreto depende la resistencia estructural del pavimento rígido o también conocido como pavimento hidráulico, esta losa también puede ser reforzada con una armadura de acero, dependiendo del uso del pavimento, el periodo de vida de estos pavimentos fluctúa entre 20 a 40 años, siendo su costo inicial una de sus principales desventajas. ***Para la presente propuesta vamos a diseñar los pavimentos de hormigón simple con barras de transferencia de carga.***

a) Pavimentos de concreto simple

Este tipo de pavimento es el más empleado debido a que su construcción es sencilla y de menor costo. Está dividido en losas rectangulares, preferiblemente casi cuadradas, salvo en las intersecciones, ramales y otras superficies de anchura variable, disponiendo en ellos juntas transversales de contracción y juntas longitudinales de alabeo entre carriles o donde la anchura extendida sea superior a 5m para evitar la aparición de fisuras debido a la retracción del hormigón.

Ambos tipos de juntas longitudinales y transversales pueden ser también de construcción u hormigonado.

❖ *Con pasadores*

Los pasadores son pequeñas barras de acero liso, que se colocan en la sección transversal del pavimento, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, mejorando así las condiciones de deformación en las juntas. De esta manera, se evitan los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamientos).

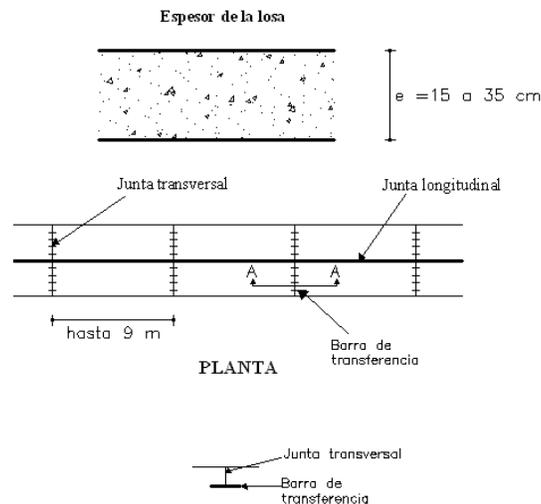


Ilustración 76.- Pavimento de concreto hidráulico simple. Con elementos de transferencia de carga o pasadores.

6.4.5. Funciones de las distintas capas de un pavimento rígido.

6.4.5.1. Sub-base

La estructura del pavimento rígido descansa sobre una capa de apoyo de buena calidad que puede ser de suelos naturales o terreno natural. Cuando no cumple el suelo natural con la función estructural, se requiere una capa de transición de tipo granular que se conoce con el nombre de Sub-base, el propósito principal es cumplir con las funciones estructurales obteniendo espesores menores de las losas del hormigón.

6.4.5.2. Capa de hormigón hidráulico

Está constituida de una losa de hormigón de cemento portland simple o reforzado ubicada en la parte superior de la estructura del pavimento, basan su capacidad portante en la losa más que en la capacidad de la sub-rasante, dado que no usan capa de base. Con la finalidad de proteger las capas inferiores, se disponen de otros elementos que son no estructurales, como las juntas de dilatación rellenas con material elastomérica (para su impermeabilización), bordillos, cunetas o bien un sistema de alcantarillado pluvial para el drenaje correcto del agua que pueda acumular en su superficie.

“El espesor de la losa de hormigón puede ser inferior a 20 cm si el tráfico es muy ligero o llegar a 40 cm en algunas pistas de aeropuertos”. (Kraemer, 1929)

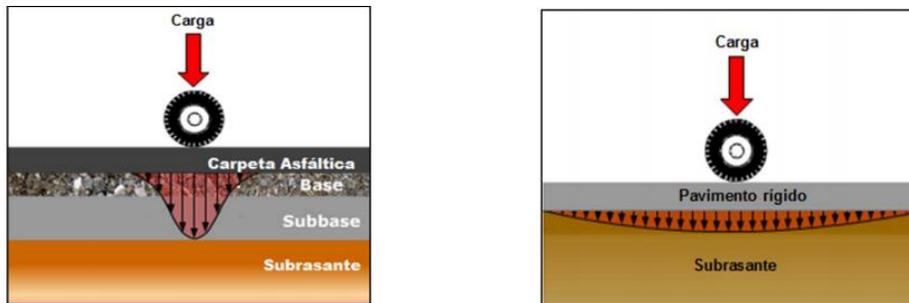


Ilustración 77.- Diagrama de distribución de carga en un pavimento rígido y flexible.

En general se puede indicar que el hormigón hidráulico distribuye mejor las cargas sobre áreas más grandes de las sub-rasantes, las deflexiones son pequeñas y las presiones aplicadas en la subrasante son muy bajas debido a su rigidez y resistencia a la flexión, es por eso que los pavimentos de hormigón no necesitan un material de cimentación muy resistente.

Sus funciones son:

- Proveer un valor soporte elevado, para que resista muy bien las cargas concentradas que provienen de ruedas pesadas, trabajando a flexión, y lo distribuye bien al material existente debajo.
- Textura superficial poco resbaladiza, aún cuando se encuentre húmeda.
- Proteger la superficie, sobre la cual está construido el pavimento, de los efectos destructivos del tránsito.
- Prevenir a la superficie de la penetración del agua.
- Buena visibilidad, por su color claro, da una mayor seguridad al tráfico nocturno de vehículos.
- Gran resistencia al desgaste, con poca producción de partículas de polvo.

6.4.6. Diseño del pavimento rígido.

6.4.6.1. Método AASHTO

El método de diseño de pavimentos rígidos por el método AASHTO, fue desarrollada en los Estados Unidos en la década de los años 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante dos años en el estado de Illinois. A partir de la versión del año 1993, el método

AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas, para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a los que imperaron en el lugar del ensayo inicial.

Un pavimento de hormigón o pavimento rígido, consiste básicamente en losas de hormigón simple o armado, apoyadas directamente sobre una base o sub-base.

Haremos énfasis a las características técnicas y de construcción que deben tener los pavimentos rígidos o llamados también hidráulicos.

6.4.6.2. Formulación

La fórmula general a la que llegó la AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, basada en los resultados obtenidos de la prueba AASHTO es la siguiente:

$$\text{Log}W_{18} = \left\{ \begin{array}{l} Z_R \times S_o + 7.35 \text{Log}(D + 1) - 0.06 + \frac{\text{Log} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} \\ + (4.22 - 0.32Pt) \times \text{Log} \left[\frac{MR \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/K)^{0.25}} \right]} \right] \end{array} \right.$$

Dónde:

D = Espesor del pavimento de hormigón en pulgadas.

ΔPSI = Diferencia de serviciabilidad.

Pt = Serviciabilidad final

W_{18} = Número de ejes equivalentes acumulados, para el período de diseño.

J = Coeficiente de transferencia de cargas.

MR = Módulo de rotura a los 28 días, en psi.

Ec = Módulo de elasticidad del hormigón, en psi.

K = Modulo de reacción de la subrasante, en pci.

Cd = Coeficiente de drenaje.

$ZR =$ Desviación normal estándar para la confiabilidad R .

$S_o =$ Error estándar combinado.

6.4.7. Variables de diseño de un pavimento rígido.

6.4.7.1. Espesor (D)

El espesor del pavimento de hormigón es la variable que pretendemos determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos. La determinación del espesor, se realiza por medio de la ecuación general de diseño de la AASHTO-93, obteniendo así el espesor (calculado).

El procedimiento de diseño normal es suponer un espesor de pavimento e iniciar a realizar tanteos, con el espesor supuesto calcular los ejes equivalentes y posteriormente evaluar todos los factores adicionales de diseño, si se cumple el equilibrio en la ecuación de diseño el espesor supuesto es el resultado del problema, en caso de no haber equilibrio en la ecuación se deberán seguir haciendo tanteos, tomando como valor inicial el resultado del tanteo anterior.

6.4.7.2. Índice de serviciabilidad

El procedimiento de Diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el Δ PSI, mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía.

❖ Escala de medición de serviciabilidad

Se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente.

$$\Delta \text{ PSI} = P_t - P_o$$

Dónde:

Δ PSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado.

$P_o =$ Índice de servicio inicial.

Pt = Índice de servicio final. Para el diseño de pavimento rígido se recomienda los siguientes valores.

a) *Serviciabilidad inicial (Po)*

Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados por AASHTO para este parámetro son:

Para pavimento de Concreto 4.5

Para pavimento de Asfalto 4.2

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad $Po = 4.7$ ó 4.8

Mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga mayor será su vida útil.

b) *Serviciabilidad Final (Pt)*

La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores recomendados según la AASHTO, son:

Para Autopistas y vías principales 2.5

Para Carreteras 2.0

6.4.7.3. *Número de ejes equivalentes acumulados, para el período de diseño (ESAL's = w18).*

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento, relacionada al número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final. Utiliza en su formulación el número ejes equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los ejes de pesos normales, en ejes sencillos equivalentes de 18 Kips (8.2 Ton).

La ecuación siguiente es la usada para calcular el parámetro del tráfico W18 en el carril de diseño.

$$ESAL's = W_{18} = DD \times DL \times w_{18}$$

Dónde:

w_{18} = Número de ejes equivalentes de 18 Kips, acumulados durante el periodo de diseño, en ambas direcciones.

DD = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

DL = Factor de carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Se recomiendan los valores de la siguiente tabla.

Tabla 47.- Factor de distribución por carril.

NUMERO DE CARRILES EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE ESAL's EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 - 100
3	60 -80
4 ó mas	50 - 75

Fuente: Guía para pavimento método AASHTO 1993.

Para el cálculo de los ejes equivalentes (w_{18}) se deberá contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil.

$$T_{vu} = T_{pa} \times FCT$$

Dónde:

T_{vu} = Tráfico en la vida útil.

T_{pa} = Tráfico durante el primer año ($T_{pa} = TPDA \times 365$).

FCT = Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la Vida Útil.

a) Factor de crecimiento del tráfico

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una *Tasa de Crecimiento Anual (r)* con la que se calcula un *Factor de Crecimiento del Tráfico (FCT)*. La tasa de crecimiento pudiera variar de acuerdo a los tipos de vehículos, ya que pueden crecer más unos tipos que otros. El factor de crecimiento del tráfico considera los *Años de Vida Útil (n)* más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

$$FCT = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Dónde:

FCT = Factor de Crecimiento del Tráfico

r = Tasa de Crecimiento.

n = Años de Vida Útil

Tabla 48.- Periodos de diseño en función del tipo de carretera (n).

TIPO DE CARRETERA	PERÍODO DE DISEÑO EN AÑOS (n)
Urbana con altos volúmenes de tráfico.	30 – 50
Interurbana con altos volúmenes de tráfico.	20 – 25
Pavimentada con bajos volúmenes de tráfico.	15 – 25
Revestidas con bajos volúmenes de tráfico.	10 – 20

Fuente: Guía para pavimento método AASHTO 1993.

b) Factor de equivalencia de carga

Una vez obtenido el tráfico para el periodo de diseño, es necesario calcular el *Factor de Equivalencia de Carga (FEC)*, el mismo que multiplicado por el tráfico de diseño da como resultado el *Número de ejes equivalentes de 18 Kips, acumulados durante el periodo de diseño, en ambas direcciones (w18)*.

$$w_{18} = Tvu \times FEC$$

Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes de 18 Kips dependen del *espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la*

serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas fórmulas:

$$FEC = \frac{1}{\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right)}$$

$$\log \frac{W_{tx}}{W_{t18}} = 4,62 \log(18 + 1) - 4,62 \log(L_x + L_2) + 3,28 \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log \frac{4,5 - Pt}{4,5 - 1,5} \qquad \beta_x = 1 + \frac{3,63 (L_x + L_2)^{5,20}}{(D + 1)^{8,45} (L_2)^{3,52}}$$

Dónde:

W_{tx} = Número de aplicaciones de carga definida al final del tiempo t .

W_{t18} = Número de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t .

L_x = Carga del eje en Kips.

L_2 = Código de eje cargado.

$L_2 = 1$ Para eje Sencillo.

$L_2 = 2$ Para eje Tándem.

$L_2 = 3$ Para eje Tridem.

$G_t = f(Pt)$

Pt = Serviciosabilidad final.

β_{18} = Valor de β_x cuando $L_x = 18$ y $L_2 = 1$

D = Espesor en pulgadas.

Es importante hacer notar que el factor de Equivalencia de Carga se calcula de manera diferente para un pavimento rígido que para un flexible.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga, debemos conocer con la mayor certeza posible los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento que estamos diseñando, ya que las sobrecargas generan un daño muy importante al pavimento.

6.4.7.4. Coeficiente de transferencia de cargas

Este factor se introduce para tener en cuenta la capacidad del pavimento de hormigón para transmitir las cargas a través de las discontinuidades (juntas o grietas). Su valor depende de varios factores:

- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Apoyo lateral de las losas

Mientras más efectiva sea la transferencia de carga entre losas mejor será el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil. Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero. En función de los parámetros anteriores se indica en el siguiente cuadro, los valores del coeficiente J.

Tabla 49.- Valores del coeficiente de transferencia de carga J.

Millones de ESAL's	Trabazón de Agregados		Con Pasajuntas		El valor de J se tendrá que ajustar de acuerdo con el Número de ESAL's que se calculen según los datos en el diseño.
	Con soporte Lateral	Sin soporte Lateral	Con soporte Lateral	Sin soporte Lateral	
Menos de 0,3	2,80	3,20	2,70	3,20	
0,3 a 1,0	3,00	3,40			
1,0 a 3,0	3,10	3,60			
3 a 10	3,20	3,80			
10 a 30	3,40	4,10			
Más de 30	3,60	4,30			

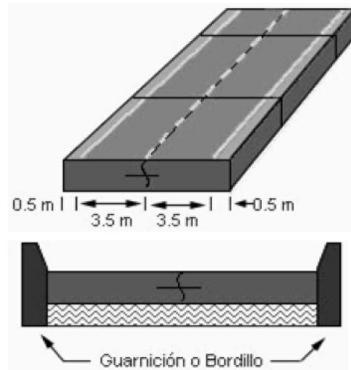
Fuente: Recomendación de la PCA para coeficientes modificados de la AASHTO.

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- El número de Ejes Equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ESAL's.

a) Apoyo lateral

El confinamiento que produce el apoyo lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el hormigón por efecto de las cargas. Un pavimento de hormigón puede considerarse lateralmente apoyado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección. Carril ancho ≥ 4.0 m



b) Barras pasajuntas o pasadores.

Barra de acero redondo liso $f_y = 4200$ kg/cm², la cual no debe adherirse al hormigón permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si debe transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa en las juntas transversales.



Ilustración 78.- Colocación de pasadores. En sentido transversal.

El diámetro, longitud y separación de las barras pasajuntas está en función del espesor de las losas principalmente. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la barra pasajuntas son las siguientes:

Tabla 50.- Recomendaciones para la selección de la barra pasajuntas.

ESPESOR DE LOSA		BARRAS PASAJUNTAS					
		DIÁMETRO		LONGITUD		SEPARACIÓN	
cm	plg	mm	plg	cm	plg	cm	Plg
13 a 15	5 a 6	20	¾	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 ¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 ½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 ¾	56	22	46	18

Fuente: Recomendación de la PCA para la selección de la barra pasajuntas.

c) Barras de amarre o Barras de unión.

Las barras de amarre se colocan a lo largo de la junta longitudinal para amarrar dos losas, con la finalidad de que se mantengan unidas y de que se asegure que la carga se transfiera a través de la junta.

La selección de las barras es en función del espesor de la losa y la distancia al extremo libre, que es la distancia desde la junta longitudinal hasta el borde libre donde no existe barra de amarre.



Ilustración 79.- Colocación Barras de unión. Sentido longitudinal.

Las barras de 12 mm de diámetro por 91 cm de longitud y separación de 76 a 101 cm son las que comúnmente se usan. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la barra de amarre son siguientes:

Tabla 51.- Recomendaciones de espaciamiento máximo.

SEPARACIÓN EN cm, SEGÚN LA DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE						
ESPESOR PAVIMENTO cm	DIÁMETRO mm	LONGITUD cm	DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE			
			3.05 m	3.66 m	4.27 m	7.32 m
≤ 14.00	12	64	64	76	76	64
14.00 – 18.00	12	71	71	76	76	51
18.00 – 21.60	16	79	79	76	71	41
21.60 – 25.40	16	81	81	91	91	56
25.40 – 30.50	16	91	91	91	91	46

Fuente: Recomendación de la PCA para la selección de las barras de amarre.

En la mayoría de las calles el pavimento es lateralmente restringido mediante un relleno por detrás de los espaldones y no hay necesidad de amarrar las juntas longitudinales con barras de amarre, sin embargo, en calles que no tengan restricciones de movimiento lateral, las barras de amarre serán colocadas a la mitad del espesor de la losa para evitar que se abra la junta debido a la contracción de las losas de hormigón.

d) Modulación de losas.

La modulación de losas se refiere a definir la forma que tendrán los tableros de losas del pavimento. Esta forma se da en base a la separación entre juntas transversales y longitudinales.

La modulación de losas va a estar regida por la separación de las juntas transversales que a su vez depende del espesor del pavimento. Existe una regla práctica que nos permite dimensionar los tableros de losas para inducir el agrietamiento controlado bajo los cortes de losas, sin necesidad de colocar acero de refuerzo continuo:

$$S = (21 \text{ a } 24) \times D$$

Dónde:

S = Separación de Juntas Transversales (≤ 6.0 m).

D = Espesor del Pavimento (cm).

Normalmente se utiliza el 21 cuando tenemos mayor fricción entre la sub base y el pavimento de hormigón, como en los casos en donde tenemos sub bases estabilizadas.

El valor de 24 se utiliza cuando la fricción entre la sub base y el pavimento corresponde valores normales, como en el caso de sub bases granulares.

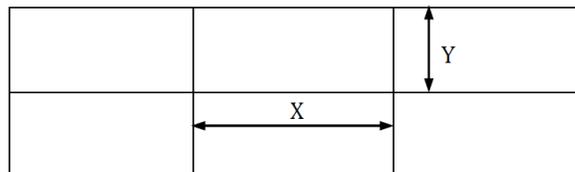
La separación de juntas transversales que arroja esta fórmula no debe ser mayor de 6.0 m, en tal caso deberá limitarse a 6.0 m. Teniendo en cuenta los siguientes valores se recomienda como límites: 4.5 a 6.0 m.

La otra dimensión para la modulación de losas es la *separación de juntas longitudinales, la cual puede estar entre los siguientes valores límites: 2.50 a 4.00 m; sin embargo esta dimensión está referenciada a la forma de los tableros.*

La forma ideal de un tablero de losa es la cuadrada, sin embargo no siempre es posible y conveniente tener las losas perfectamente cuadradas, por lo que nos vemos obligados a considerar un cierto grado de rectangularidad.

La relación entre largo y ancho de un tablero deberá estar dentro de los siguientes límites: 0.71 a 1.40.

$$0.71 < \frac{X}{Y} < 1.40$$



6.4.7.5. Propiedades del hormigón

Son dos las propiedades del hormigón que influyen en el diseño de un pavimento de hormigón y en el comportamiento a lo largo de su vida útil:

- Módulo de Rotura (MR).
- Módulo de Elasticidad del hormigón (E_c).

❖ Módulo de Rotura (MR).

Debido a que los pavimentos de hormigón trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del hormigón trabajando a flexión, (MR) normalmente especificada a los 28 días.

❖ **Módulo de Elasticidad (E_c).**

El Módulo de Elasticidad del hormigón está íntimamente relacionado con su Módulo de Rotura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Rotura.

6.4.7.6. Módulo de reacción del suelo

El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub base. Ya que la finalidad principal de la capa de la sub base es evitar el efecto del bombeo de finos, no es necesario ni tampoco económico utilizar sub bases gruesas.

Los espesores de sub-base de 10 a 15 cm se especifican generalmente en proyectos comunes de construcción, como una manera práctica de garantizar el espesor mínimo de 5 a 7.5 cm, necesario para evitar el bombeo. Para conocer el valor K (Suelo – Sub-base).

Tabla 52.- Incremento en el valor K del suelo, según el espesor de una base granular.

K Suelo – Sub – base (pci)				
K del Suelo (pci)	Espesor de la Sub – base			
	4’’	6’’	9’’	12’’
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente: Tomado del Manual de la “Asociación del Cemento Portland” PCA.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tenga diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, el método AASHTO recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño estructural.

Para nuestro diseño el valor de K lo determinaremos mediante la correlación con el valor de C.B.R., debido al costo y dificultad de la prueba de placas.

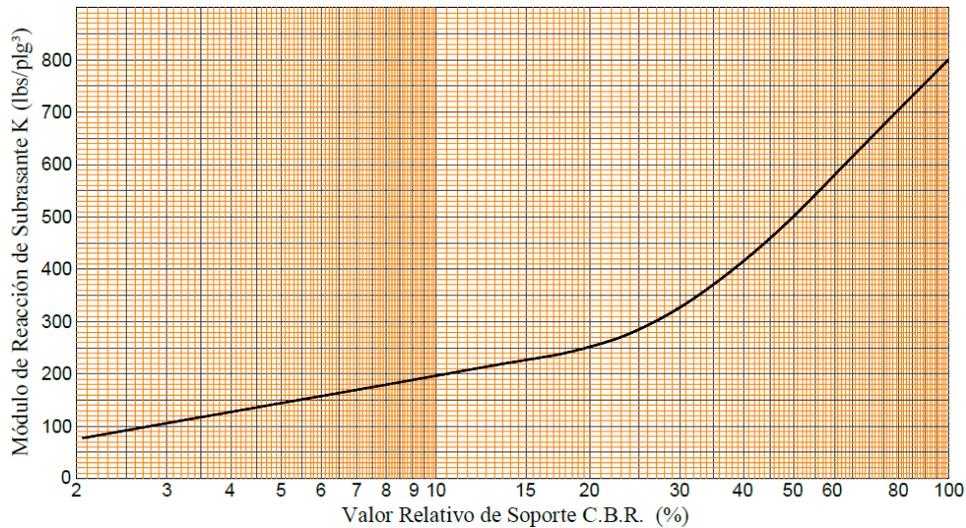


Ilustración 80.- Relación entre el valor relativo de soporte (C.B.R.) y el módulo de reacción de la subrasante (k).

6.4.7.7. Coeficiente de drenaje

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil, y por lo tanto lo es también en el diseño del mismo. Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento. Tener agua atrapada en la estructura del pavimento produce efectos nocivos en el mismo, como pueden ser:

- Reducción de la resistencia de materiales granulares no ligados.
- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos (bombeo).
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos.

El valor del coeficiente de drenaje depende de dos parámetros: La calidad del drenaje, que viene determinada por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento y el porcentaje de tiempo a lo largo del año durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación. Dicho porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje, la AASHTO considera cinco calidades de drenaje, que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 53.- Calidad de drenaje.

CALIDAD DEL DRENAJE	AGUA ELIMINADA EN:
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	El agua no drena

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

Combinando las variables anteriormente indicadas, se recomienda adoptar para el coeficiente de drenaje (Cd) los valores indicados en la siguiente tabla:

Tabla 54.- Valores del coeficiente de drenaje Cd.

CALIDAD DEL DRENAJE	Porcentaje de tiempo en el año, que la estructura del Pavimento está expuesta a un nivel de humedad próximo a la saturación.			
	< 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Buena	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

6.4.7.8. Desviación estándar

Al igual que para diseño de pavimento flexible los valores de la desviación estándar (ZR) van asociados a un nivel de confiabilidad (R). Los valores de ZR para el diseño de pavimento flexible son los mismos del diseño de pavimento rígido.

Tabla 55.- Niveles de confiabilidad (R) para diferentes carreteras.

TIPO DE CARRETERA	NIVELES DE CONFIABILIDAD (%)	
	URBANO	RURAL
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias Principales	80 - 99	75 – 95
Colectoras	80 - 95	75 – 95
Locales	50 - 80	50 – 80

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

Tabla 56.- Valores de ZR en función de la confiabilidad.

NIVEL DE CONFIANZA	ZR	NIVEL DE CONFIANZA	ZR
50	0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

6.4.7.9. Error estándar combinado

Este parámetro *está ligado directamente con la Confiabilidad (R)*, deberá seleccionarse un valor, representativo de condiciones locales particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tráfico.

La Guía AASHTO recomienda adoptar valores para S_o comprendidos dentro de los siguientes intervalos: Pavimentos rígidos: 0.30 – 0.40

0.35 = construcción nueva y 0.40 = sobrecapas

6.4.8. Juntas de hormigonado.



Ilustración 81.- Sellado de juntas.

La función de las juntas consiste en mantener las tensiones de la losa provocadas por la contracción y expansión del pavimento dentro de los valores admisibles del concreto; o disipar tensiones debidas a agrietamientos inducidos debajo de las mismas losas.

Son muy importantes para garantizar la duración de la estructura, siendo una de las pautas para calificar la bondad de un pavimento. Por otro lado, deben ser rellenas con materiales apropiados, utilizando técnicas constructivas específicas. En consecuencia, la conservación y oportuna reparación de las fallas en las juntas son decisivas para la vida útil de un pavimento.

De acuerdo a su ubicación respecto de la dirección principal o eje del pavimento, se denominan como longitudinales y transversales. Según la función que cumplen se les denomina de contracción, articulación, construcción expansión y aislamiento. Según la forma, se les denomina, rectas, machimbradas y acanaladas.

6.4.8.1. Juntas De Contracción

Su objetivo es inducir en forma ordenada la ubicación del agrietamiento del pavimento causada por la contracción (retracción) por secado y/o por temperatura del concreto. Se emplea para reducir la tensión causada por la curvatura y el alabeo de losas. Los pasadores se pueden usar en las juntas de contracción para la transferencia de cargas, bajo ciertas condiciones. Sin embargo, se espera que la transferencia de cargas se logre mediante la trabazón entre los agregados.

En la siguiente figura se observan los diferentes tipos de juntas de contracción:

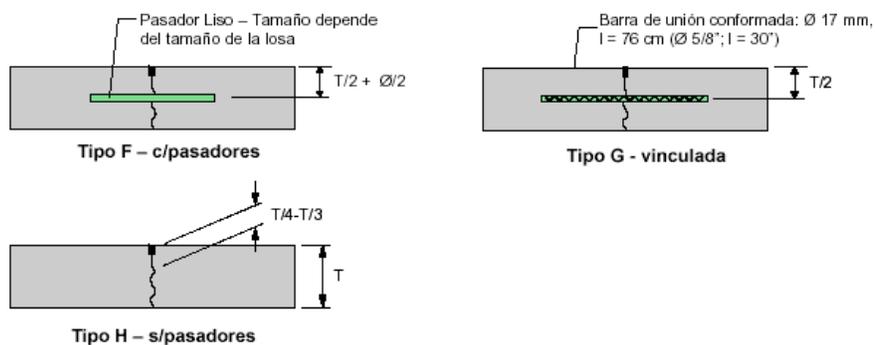


Ilustración 82.- Tipos de juntas de contracción.

6.4.8.2. Juntas De Construcción

Las juntas de construcción separan construcciones contiguas colocadas en diferentes momentos, tales como la colocación al final del día o entre fajas de pavimentación. La transferencia de cargas se logra mediante el empleo de pasadores. Pueden ser transversales o

longitudinales. En la siguiente figura se observan los diferentes tipos de juntas de construcción.

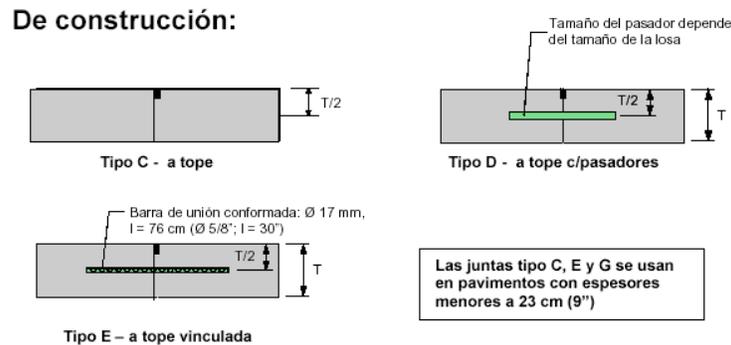


Ilustración 83.- Tipos de juntas de construcción.

6.4.8.3. Juntas De Expansión O Aislación

Se usan para aislar pavimentos que se interceptan con la finalidad de disminuir los esfuerzos de compresión en éstos, cuando se expanden por el aumento de temperatura. También se utilizan para aislar estructuras existentes. En la siguiente figura se muestran los diferentes tipos de juntas de expansión.

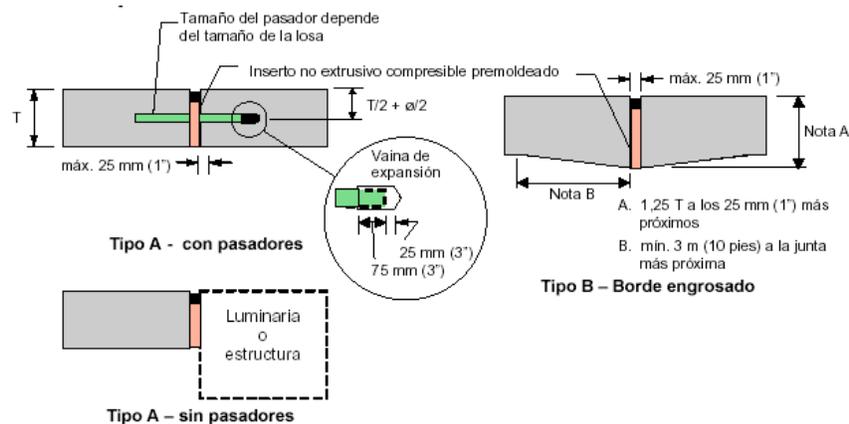
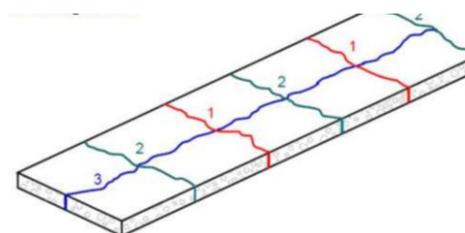


Ilustración 84.- Tipos de juntas de expansión.

Para controlar y reducir los efectos perjudiciales del agrietado, o para transferir las cargas entre losas adyacentes, se acude al uso de hierros redondos de distribución o barras de anclaje y pasadores.

6.4.9. Fallas del pavimento rígido.



- **Fisuración inicial (transversal)**
- **Fisuración intermedia (transversal)**
- **Fisuración longitudinal.**

Las fallas, en los pavimentos rígidos, se deben principalmente a dos causas; la primera se debe a las deficiencias de la propia losa debido, por un lado, al concreto utilizado, haciendo referencia a los materiales y agregados; por otro lado se tienen los defectos estructurales de la losa, como podrían ser la mala colocación, insuficiente dotación de elementos de transmisión de carga, insuficiente resistencia ante las restricciones de fricción impuestas a los movimientos de la losa por la sub base, alabeo de las losas o mal comportamiento de las juntas de contracción o expansión.

Otra causa de falla, en los pavimentos rígidos, se refiere al inadecuado comportamiento estructural del conjunto de losa, sub base, sub rasante y aún terracería y terreno de cimentación. Frecuentemente las fallas obedecen a una combinación de causas, antes que a una sola, de manera que los problemas de diagnóstico y corrección se hacen complicados.

El uso de agregados inapropiados, no duraderos, se traduce en la aparición de grietas que comienzan por ser capilares, muy próximas y que se desarrollan con trayectorias semicirculares en torno a juntas o a los bordes de las losas; el fenómeno es progresivo y suele terminar con la desintegración total de la losa.

6.5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

6.5.1. El hormigón convencional y modificado para aplicar en el diseño del pavimento rígido.

En los capítulos anteriores se realizó un estudio experimental, sobre las propiedades del hormigón modificado con fibras de polímero elástico, de tamaño variable y superficie rugosa, procedentes de la trituración de los neumáticos en desuso.

En dichos capítulos se documentó la compatibilidad entre el polímero elástico y el hormigón, se obtuvieron las propiedades más importantes de la mezcla. Aunque se llegó a mezclar hasta un 10% del peso en referencia del agregado fino, por eficiencia de trabajabilidad, puesta en obra y propiedades mecánicas, se optó por recomendar mezclas con adición del 2% de polímero elástico triturado en hormigón.

Por lo tanto, las propiedades del hormigón convencional y modificado escogidas para el diseño del pavimento, son los de la primera etapa, por los beneficios obtenidos en la misma.

6.5.1.1. Ensayo a Compresión (Adición).

EDAD	Hormigón convencional	Hormigón Modificado			
	MPa	2%	5%	7%	10%
3	9,53	7,66	7,21	5,88	6,45
7	18,22	16,45	12,63	11,80	9,62
28	31,30	28,11	22,24	19,81	16,96

6.5.1.2. Módulo de elasticidad estático (Adición).

MEZCLAS	CILINDRO			A.C.I. 363 ¹⁰	
	Diámetro	Altura	Carga	Ec (Experimental)	Ec (Ecuación)
	cm	cm	kg	MPa	MPa
Hormigón convencional	15,20	30,45	56248	26170	25205
H.M.+2%F	15,23	30,40	45738	20338	23377
H.M.+5%F	15,23	30,50	41883	15492	22668
H.M.+7%F	15,23	30,45	37942	11118	21908
H.M.+10%F	15,22	30,50	36322	13070	21694

¹⁰ El código del ACI en el Capítulo 5 pagina 23, del Comité 363 expresa que el módulo estático de elasticidad podría ser calculado en función de la resistencia.

6.5.1.3. Resistencia a la tracción por compresión diametral (Adición).

Edad del espécimen (días)	MEZCLA Hormigón	Promedio Resistencia C. Diametral (MPa)
28	H. Convencional	3.972
28	H.M.+2%F	3.741
28	H.M.+5%F	3.245
28	H.M.+7%F	3.150
28	H.M.+10%F	2.605

6.5.1.4. Resistencia a la flexión (Adición).

Edad del espécimen (días)	Hormigón	Promedio Resistencia Flexión (MPa)
28	H. Convencional	6.175
28	H.M.+2%F	7.271
28	H.M.+5%F	5.739
28	H.M.+7%F	5.429
28	H.M.+10%F	6.766

6.5.1.5. Capacidad de Absorción, densidad y porosidad (Adición).

Muestra	Densidad absoluta	Absorción después de inmersión	Densidad seca global (o bruta)	Densidad aparente	Volumen de vacíos (espacio de poros permeables)	Volumen total de vacíos
	g/cm ³	%	g/cm ³	g/cm ³	%	%
H. Convencional	2.28	6.11	2.09	2.37	12.14	8.53
N.M. + 2%F	2.26	6.18	2.07	2.35	11.90	8.35
N.M. + 5%F	2.17	6.56	2.06	2.36	12.56	5.05
N.M. + 7%F	2.26	9.29	2.09	2.52	16.95	7.50
N.M. + 10%F	2.17	8.76	2.14	2.56	16.39	1.47

6.5.1.6. Esfuerzo de adherencia (Adición).

MEZCLAS	Fuerza tensión (kN)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de Adherencia (kg/cm ²)	Esfuerzo de Adherencia (MPa)	Tipo de falla
Hormigón convencional	17,49	222,69	106,68	10,46	Pull - put
N.M. + 2%F	15,24	194,05	92,23	9,04	Pull - put
N.M. + 5%F	12,41	158,05	80,18	7,86	Pull - put
N.M. + 7%F	10,84	138,00	68,95	6,76	Pull - put
N.M. + 10%F	10,83	137,83	67,09	6,58	Pull - put

6.5.2. Diseñar el pavimento rígido por el método AASHTO.

El propósito del diseño es determinar el espesor del pavimento rígido, aplicando todos los parámetros establecidos en la ecuación general del AASHTO. Para lograr comparar el diseño del pavimento rígido con hormigón convencional y modificado se va utilizar las mismas condiciones de suelo y tráfico.

Por lo cual, entre los parámetros requeridos para el diseño, los datos faltantes se definirán de un estudio existente de pavimento. *“Evaluación del pavimento flexible de la vía Calpi – San Juan, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo de la abscisa 0+000 km a 14+500 km”*.

Debido a que los pavimentos de hormigón trabajan principalmente a flexión es recomendable, tomar en consideración la resistencia del hormigón trabajando a flexión, (MR) y El Módulo de Elasticidad del hormigón, la cual está íntimamente relacionado con su módulo de rotura.

Dos de las propiedades del hormigón que influyen en el diseño de un pavimento de hormigón y en el comportamiento a lo largo de su vida útil. Datos que están determinados en la presente investigación.

6.5.3. Análisis comparativos de costos.

Cuantificar los volúmenes y cantidades de obra para un tramo de 1 km de estudio, luego se procederá a realizar el análisis de precios unitarios para el pavimento convencional y modificado.

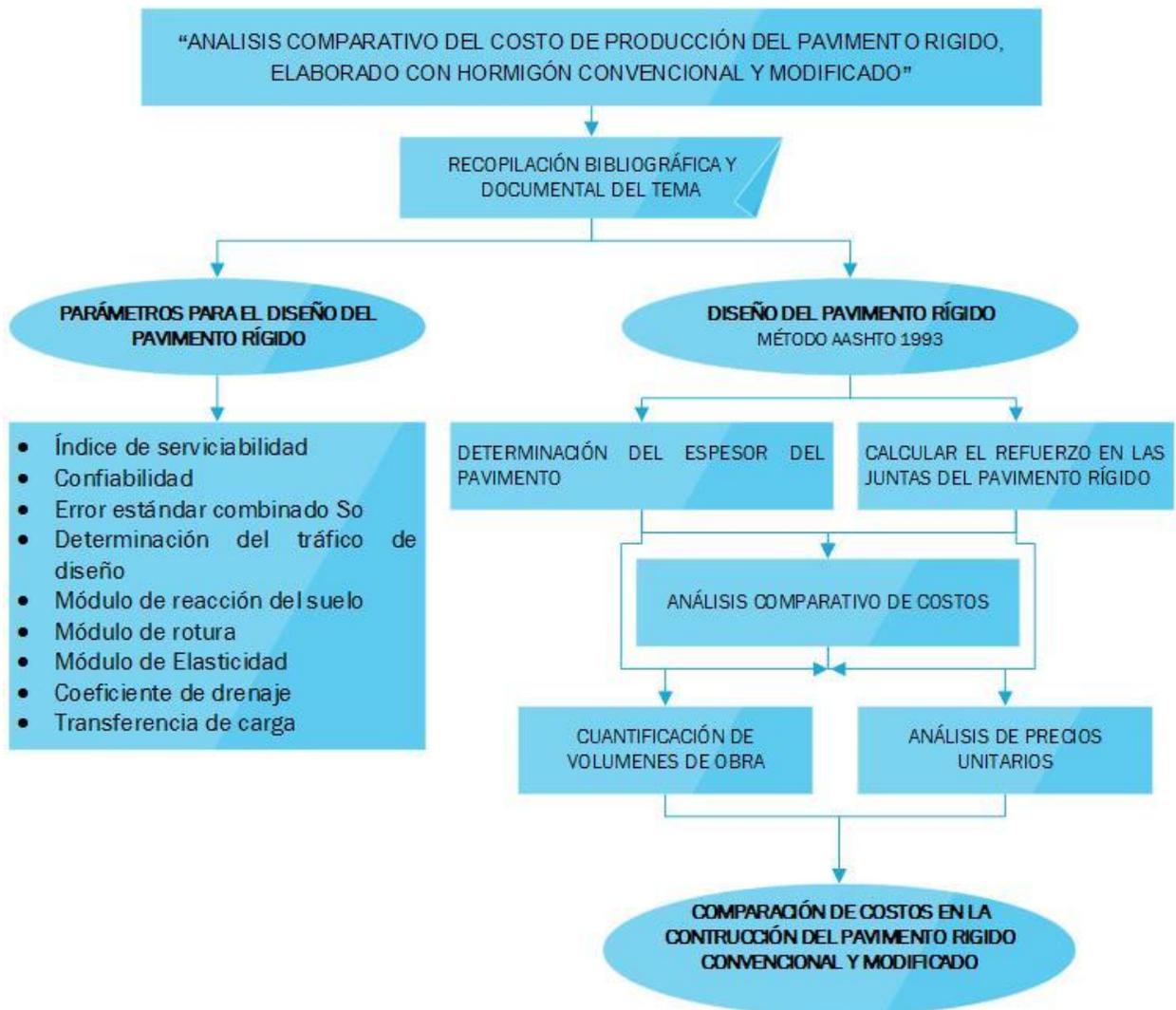
La importancia del presupuesto de obra de un proyecto, es muy considerable por ser el documento básico que establece el marco económico para la ejecución de las obras. De los valores conseguidos, saldrán los precios que competirán con otros ofertantes y harán, ganar o perder la adjudicación, o en el caso de consultoría o diseño se tendrá el presupuesto referencial.

Para el desarrollo del presupuesto de una obra, se analizan los siguientes aspectos:

- Rubro: El "Concepto de trabajo" (o trabajo específico), el servicio, la actividad o el bien, para el cual se han definido unidades de medida, calculado cantidades y previsto una compensación o pago.

- Unidad: Es el término mediante el cual se puede cuantificar la actividad realizada.
- Cantidad de Obra: Es la magnitud de la actividad realiza en la ejecución del proyecto, estos valores son determinados al término del diseño, en base a sus planos y características.
- Costo Unitario: Es el valor monetario que demanda la realización de la actividad por unidad de obra.
- Costo Total: Es el valor monetario que se necesita para la ejecución de una actividad en la totalidad de la obra.

6.6. DISEÑO ORGANIZACIONAL



6.7. MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA

6.7.1. Diseño de pavimento rígido (hormigón convencional) de la Vía Calpi – San Juan, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo de la abscisa 0+000 km a 14+500 km.

El diseño de pavimento se lo realiza con el Método AASHTO 1993 aplicado al Ecuador, el mismo que es adoptado por el Ministerio de Transporte Obras Públicas.

6.7.1.1. Variables de Diseño

a) Índice de Serviciabilidad

Como el índice de serviciabilidad final de un pavimento es el valor más bajo de deterioro a que puede llegar el mismo, se sugiere que para carreteras de primer orden (de mayor tránsito) este valor sea de 2.5 y para vías menos importantes sea de 2.0; para el valor del índice de serviciabilidad inicial la AASTHO llegó a un valor de 4.5 para pavimentos de concreto y 4.2 para pavimentos de asfalto.

Entonces:

Po =	4.5
Pt =	2.0

$$\Delta \text{PSI} = \text{Po} - \text{Pt}$$

$\Delta \text{PSI} =$	2.50
-----------------------	------

b) Confiabilidad.

La confiabilidad (R%) es la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación.

También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

De acuerdo a la tabla 55 tomamos el valor del 50 % porque es un vía local, de área rural correspondiente a la clasificación de la AASHTO.

R (%) =	50.000
---------	--------

c) **Desviación estándar (Zr).**

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad. La tabla 56, muestra los valores de Zr en función de la confiabilidad, se opta una confiabilidad del 50% correspondiente a $Z_r = 0$.

Tabla 57.- Valores de ZR en función de la confiabilidad.

Confiabilidad R (%)	Desviación Estándar. (Zr)
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

Zr = 0.000

d) **Error estándar combinado (So).**

Se adopta $S_o = 0,35$. (Recomendado para pavimento rígido).

Tabla 58.- Variabilidad o Error Estándar Combinado So.

Para pavimentos rígidos	0.30 – 0.40
En construcción nueva	0.35
En sobre capas	0.4

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

So = 0.35

e) **Tráfico (W18).**

El método AASTHO diseña los pavimentos de concreto por fatiga. La fatiga se entiende como el número de repeticiones ó ciclos de carga que actúan sobre un elemento determinado. Al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que se está haciendo es tratar de estimar, en un periodo de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento. La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años.

❖ **Trafico ESAL'S**

$$ESAL's = TDP \times A \times B \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \times FC$$

Dónde:

ESAL's= Número estimado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

TPD= Transito promedio diario inicial

A= Porcentaje estimado de vehículos Pesados (buses camiones)

B= Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño

r= Tasa anual de crecimiento de transito

n= Periodo de diseño

FC= Factor camión

TPD=	3220	TPDA ¹¹
A=	100%	
B=	50%	
r=	3%	
n=	20	años
FC=	1.2	

Los parámetros siguientes en la obtención del ESAL's se presenta a continuación:

Tabla 59.- Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño.

NUMERO DE CARRILES	PORCENTAJE DE VEHICULOS PESADOS EN EL CARRIL DE DISEÑO			
2		50		
4		45		
6 a mas		40		

¹¹ Dato obtenido del Proyecto de tesis: García, I. Evaluación del pavimento flexible de la vía Calpi – San Juan. UNACH. Pag.337.

Como el número de carril de diseño es de 2, tomamos el valor del 50% según la tabla, de los vehículos pesados esperados en la vía.

❖ **Factor de crecimiento del tráfico (r)**

Tabla 60.- Factor de crecimiento del tráfico.

CASO	TASA DE CRECIMIENTO
Crecimiento Normal	1% al 3%
Vías complet. saturadas	0% al 1%
Con trafico inducido	4% al 5%
Alto crecimiento	mayor al 5%

Fuente: Guía para pavimentos, método AASHTO 1993.

Se contaba con la tasa de crecimiento vehicular presentada en la investigación de “EVALUACION DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA VIA CALPI – SAN JUAN”, pero su valor era menor a la presentada por la tabla de la AASHTO, por lo que optamos por el valor más crítico 3%.

Período de diseño (Pd)

De acuerdo a la vía interurbana con altos volúmenes de tráfico el periodo de diseño según la siguiente tabla 48 es de 20 años.

Factor Camión (Fc)

El factor camión es de 1.20

$$ESAL's = 19,314,418.05$$

Al resultado del ESAL's se le aplica la fórmula:

$$ESAL's = W_{18} = DD \times DL \times w_{18}$$

DD = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

$$DD = 0.50$$

DL = Factor de carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Se recomiendan los valores de la siguiente tabla.

Tabla 61.- Factor de distribución por carril.

NUMERO DE CARRILES EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE ESAL's EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4 ó mas	50 - 75

Fuente: Guía para pavimento método AASHTO 1993.

$$F_c = 0.80$$

Aplicando la ecuación se tiene el valor del ESAL'S modificado que es uno de los parámetros requeridos para la determinación del espesor de diseño.

$$ESAL's = 7,725,767.22$$

f) Módulo de reacción del suelo

Se han propuestos algunas correlaciones de “K”, a partir de datos de datos de CBR de diseño de la Sub Rasante, siendo una de las más aceptadas por ASSHTO. Las expresiones siguientes:

$$K = 2.55 + 52.5(\text{Log CBR}) \quad \text{Mpa/m} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} \leq 10$$

$$K = 46.0 + 9.08(\text{Log CBR})^{4.34} \quad \text{Mpa/m} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} > 10$$

CBR sub rasante= 16.0^{12} (Ibeth, 2015)

$$K = 66.33$$

¹² Dato obtenido del Proyecto de tesis: García, I. Evaluación del pavimento flexible de la vía Calpi – San Juan. UNACH. Pag.344.

g) Coeficiente de drenaje

Para el cálculo del Coeficiente de Drenaje se tomará en cuenta el periodo regular lluvioso de la ciudad de Chimborazo (de Octubre a Mayo), considerándose 3 días a la semana con precipitaciones que generan saturación.

Se considera 10 días de lluvia al año que podrían producir condiciones de Saturación aparte del periodo lluvioso establecido en el apartado anterior.

La Calidad del drenaje lo consideraremos bueno de acuerdo a la tabla 53, luego de ejecutarse la Construcción del pavimento Rígido.

Fecha Inicio: 01/10/2015

Fecha Final: 01/05/2016

Total de días de Noviembre a Marzo =	213	Total de semanas =	30
Días a la Semana que generan saturación =	3	Días al año que producen saturación =	10
Total de días que generan saturación =	100	% de tiempo del pavimento expuesto a Saturación =	27.40%

Con este porcentaje nos dirigimos a la tabla siguiente para obtener el coeficiente de drenaje.

Tabla 62.- Valores del coeficiente de drenaje Cd.

Calidad de Drenaje	% de tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de saturación			
	Menor a 1%	1% a 5%	5% a 25%	Mayor a 25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía para pavimento método AASHTO 1993.

Cd = 1.00

h) Coeficiente de transferencia de carga (J)

De acuerdo a la tabla 49 se obtiene el valor de transferencia de carga que depende del número de ESAL'S, utilización de pasa juntas y apoyo lateral.

Dando como valor 3.4, como el valor del ESAL'S es mayor a 5 millones se considera pasa juntas.

$$J = 3.4$$

i) Módulo de Ruptura (Mr)

$$f'c = 313 \text{ Kg/cm}^2$$

$$MR = K \sqrt{f'c}$$

Dónde:

K= constante de la subrasante comprendida generalmente entre 8 y 10. K =8 (Agregados redondeados) y cuando K=10 (Agregados triturados).

f'c= resistencia a la compresión simple a los 28 días en psi.

$$MR = 673.27 \text{ Psi} \text{ Dato según la AASHTO}$$

Pero se trabaja con el resultado de los ensayos realizados del módulo de rotura Ver tabla 33 = 6.18 MPa

$$MR = 895.61 \text{ Psi} \text{ Dato ensayo Directo}$$

j) Módulo de elasticidad del concreto (Ec)

Se denomina Módulo de elasticidad del concreto a la tracción, a la capacidad que obedece la ley de Hooke, es decir, la relación de la tensión unitaria a la deformación unitaria. Se determina por la Norma ASTM C469. Sin embargo en caso de no disponer de los ensayos experimentales para su cálculo existen varios criterios con los que pueda estimarse ya sea a partir del Módulo de Ruptura, o de la resistencia a la compresión a la que será diseñada la mezcla del concreto.

$$Ec = 15000 \times (f'c)^{1/2} \text{ (En kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 1500 \times (313)^{1/2}$$

$$E_c = 267.908,57 \text{ kg/cm}^2$$

Dato según la AASHTO

$$E_c = 3.810.554,63 \text{ Psi}$$

Pero se considera el resultado de los ensayos realizados en la tabla 23 $E_c = 26\ 170 \text{ Mpa} = 266859,73 \text{ kg/cm}^2$

Dato ensayo Directo

$$E_c = 3.795.644,46 \text{ Psi}$$

Valor con los que se trabaja en la determinación del espesor final.

6.7.1.2. Determinación del Espesor.

Según la formula General AASHTO se realiza tanteos del espesor hasta que la ecuación I y II sean aproximadamente iguales:

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ec.I) Sea aproximadamente Igual a (Ec.II): **D = 7.200 in**

$$\text{Log}_{10} (W18) - Z_r \times S_o + 0.06 = 6.948 \text{ Ec. I}$$

$$7.35 \times \text{Log}_{10} (D + 1) + \frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32 \times Pt) \times \text{Log}_{10} \left[215.63 \frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \times (D^{0.75} - \frac{18.42}{(\frac{E_c}{k})^{0.25}})} \right] = 6.995 \text{ Ec. II}$$

Espesor de la Losa de Concreto
Calculado =
Espesor de la Losa de Concreto
Adoptado =

D = 18.29	cm
D = 19.00	cm

6.7.2. Diseño de pavimento rígido (hormigón modificado) de la Vía Calpi – San Juan, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo de la abscisa 0+000 km a 14+500 km.

El diseño de pavimento se lo realiza con el Método AASHTO 1993 aplicado al Ecuador, el mismo que es adoptado por el Ministerio de Transporte Obras Públicas.

6.7.2.1. Variables de Diseño

Las variables de diseño son similares al diseño del hormigón convencional, cambiando las propiedades del material.

a) Módulo de ruptura (M_r)

$$f_c = 281 \text{ kg/cm}^2$$

$$MR = K \sqrt{f'c}$$

Dónde:

K = constante de la subrasante comprendida generalmente entre 8 y 10. $K = 8$ (Agregados redondeados) y cuando $K = 10$ (Agregados triturados).

$f'c$ = resistencia a la compresión simple a los 28 días en psi.

$$MR = 630.78 \text{ Psi} \quad \text{Dato según la AASHTO}$$

Pero se trabaja con el resultado de los ensayos realizados del módulo de rotura Ver tabla 33 = 7.27 MPa

$$MR = 1054.57 \text{ Psi} \quad \text{Dato ensayo Directo}$$

b) Módulo de elasticidad del concreto (E_c).

Se denomina Módulo de elasticidad del concreto a la tracción, a la capacidad que obedece la ley de Hooke, es decir, la relación de la tensión unitaria a la deformación unitaria. Se determina por la Norma ASTM C469. Sin embargo en caso de no disponer de los ensayos experimentales para su cálculo existen varios criterios con los que pueda estimarse ya sea a partir del Módulo de Ruptura, o de la resistencia a la compresión a la que será diseñada la mezcla del concreto.

$$E_c = 15000 \times (f'c)^{1/2} \text{ (En kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 1500 \times (281)^{1/2}$$

$$E_c = 250,998.01 \text{ kg/cm}^2$$

Dato según la AASHTO

$$E_c = 3,570,030.01 \text{ Psi}$$

Pero se considera el resultado de los ensayos realizados ver tabla 23 $E_c = 20\,338 \text{ MPa} = 207389,88 \text{ kg/cm}^2$

Dato ensayo Directo

$$E_c = 2,949,782.84 \text{ Psi}$$

Valor con los que se trabaja en la determinación del espesor final.

6.7.2.2. Determinación del Espesor

Según la formula General AASHTO se realiza tanteos del espesor hasta que la ecuación I y II sean aproximadamente iguales:

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ec.I) Sea aproximadamente Igual a (Ec.II): **D = 6.080**

$$\text{Log}_{10}(W18) - Z_r \times S_o + 0.06 = 6.948 \text{ Ec. I}$$

$$7.35 \times \text{Log}_{10}(D + 1) + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32 \times P) \times \text{Log}_{10}\left[215.63 \frac{S'c \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \times (D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}})}\right] = 6.854 \text{ Ec. II}$$

Espesor de la Losa de Concreto Calculado

D = 15.44	cm
------------------	-----------

Espesor de la Losa de Concreto Adoptado

D = 15.00	cm
------------------	-----------

Resultado del espesor de un hormigón modificado.

6.7.3. Cantidades de obra Pavimento rígido con hormigón convencional.

El proceso del cálculo de cantidades de obra para cada actividad constructiva es conocido comúnmente como cubicación, y requiere de una metodología que permita obtener la información de una manera ordenada y ágil, y que adicionalmente, ofrezca la posibilidad de revisar, controlar y modificar los datos cada que sea necesario.

La estructura del pavimento queda de la siguiente forma:

❖ Pavimento rígido con hormigón convencional:



6.7.3.1. Capa de Hormigón

Capa de hormigón = $L \times a \times e$

Capa de hormigón = $1000m \times 16m \times 0,19m$

Capa de hormigón = 3 040 m³

6.7.3.2. Capa de Sub-base

Capa de hormigón = $L \times a \times e$

Capa de hormigón = $1000m \times 16m \times 0,15m$

Capa de hormigón = 2 400 m³

6.7.3.3. Modulación de losas

❖ Separación máxima de juntas transversales ($X = S$)

$$S = (24 \times D) \leq 6m$$

$$S = (24 \times 19) \leq 6m$$

$$S = 4,56 m$$

S = 5,00 m Valor asumido.

Longitud de estudio (L) = 1000 m

Ancho de estudio (a) = 16 m

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{L}{S} - 1$$

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{1000}{5} - 1$$

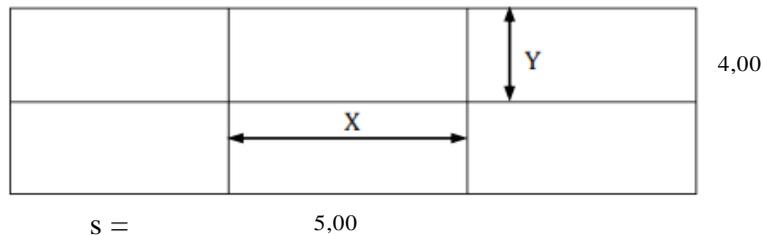
de Juntas transversales = 199 Unidades

Longitud necesaria de junta = 199 x 16 m

Longitud necesaria de junta = 3 184 m

❖ Separación máxima de juntas longitudinales (Y)

$$0.71 < \frac{X}{Y} < 1.40$$



Y = 4,00 m Valor asumido.

$$\text{Número de Longitudinales} = \frac{a}{Y} - 1$$

$$\text{Número de Longitudinales} = \frac{16}{4} - 1$$

Número de Juntas Longitudinales = 3 Unidades

Longitud necesaria de junta = 3 x 1000 m

Longitud necesaria de junta = 3000 m

6.7.3.4. Cálculo del acero transversal.

Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la barra de amarre son las del siguiente cuadro:

SEPARACIÓN EN cm, SEGÚN LA DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE						
ESPESOR PAVIMENTO cm	DIÁMETRO mm	LONGITUD cm	DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE			
			3.05 m	3.66 m	4.27 m	7.32 cm
≤ 14.00	12	64	76	76	76	64
14.00 - 18.00	12	71	76	76	76	51
18.00 - 21.60	16	79	76	76	71	41
21.60 - 25.40	16	81	91	91	91	56
25.40 - 30.50	16	91	91	91	91	46

De acuerdo al espesor calculado se va colocar una varilla $\phi 16@ 71$ cm con una longitud de 79 cm.

$$\text{Longitud de estudio } (L) = 1000 \text{ m}$$

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{L}{\text{Separación}}$$

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{1000}{0,71} + 1$$

$$\# \text{ de varillas necesarias} = 1409 \text{ Unidades}$$

$$\text{Longitud necesaria de varilla} = 1409 \times 0,79 \text{ m} \times 3 \text{ juntas longitudinales.}$$

$$\text{Longitud necesaria de varilla} = 3340 \text{ m}$$

$$\text{Peso de varilla necesaria} = 3340 \text{ m} \times 1,578$$

$$\text{Peso de varilla necesaria} = 5271 \text{ kg}$$

6.7.3.5. Cálculo del acero longitudinal.

ESPESOR DE LOSA		BARRAS PASAJUNTAS					
		DIÁMETRO		LONGITUD		SEPARACIÓN	
cm	plg	mm	plg	cm	plg	cm	plg
13 a 15	5 a 6	20	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1¾	56	22	46	18

Partiendo del espesor de la losa, podemos escoger el diámetro, longitud y la separación de las varillas longitudinales.

Se va colocar una varilla $\phi 25 @ 30$ cm con una longitud de 46 cm.

Ancho de estudio (a) = 16 m

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{a}{\text{Separación}}$$

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{16}{0,30} + 1$$

de Juntas transversales = 54 Unidades

Longitud necesaria de varilla = 54 x 0,46 m x 199 juntas transversales.

Longitud necesaria de varilla = 4 974 m

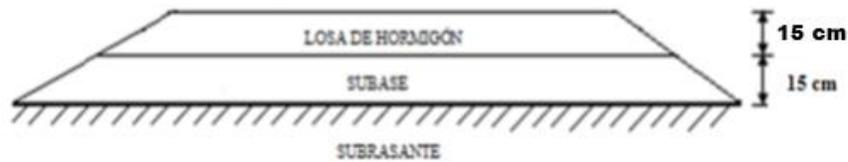
Peso de varilla necesaria = 4 974 m x 3,853

Peso de varilla necesaria = 19 165 kg

6.7.4. Cantidades de obra Pavimento rígido con hormigón modificado.

La estructura del pavimento queda de la siguiente forma:

- ❖ Pavimento rígido con hormigón modificado adición del 2% de polímero elástico:



6.7.4.1. Capa de Hormigón

Capa de hormigón = $L \times a \times e$

Capa de hormigón = 1000m x 16m x 0,15m

Capa de hormigón = 2 400 m³

6.7.4.2. Capa de Sub-base

Capa de hormigón = L x a x e

Capa de hormigón = 1000m x 16m x 0,15m

Capa de hormigón = 2 400 m³

6.7.4.3. Modulaci3n de losas

❖ Separaci3n m3xima de juntas transversales (X = S)

$$S = (24 \times D) \leq 6m$$

$$S = (24 \times 15) \leq 6m$$

$$S = 3,6 m$$

S = 4,00 m Valor asumido.

Longitud de estudio (L) = 1000 m

Ancho de estudio (a) = 16 m

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{L}{S} - 1$$

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{1000}{4} - 1$$

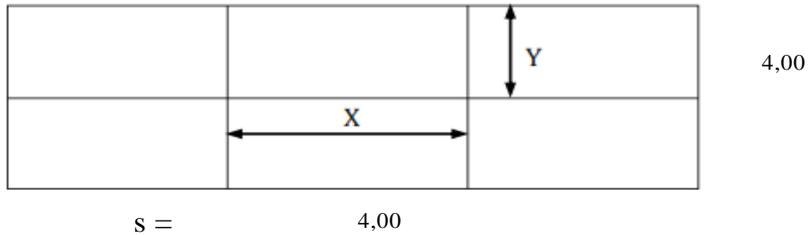
de Juntas transversales = 249 Unidades

Longitud necesaria de junta transversal = 249 x 16 m

Longitud necesaria de junta transversal = 3984 m

❖ Separación máxima de juntas longitudinales (Y)

$$0.71 < \frac{X}{Y} < 1.40$$



Y = 4,00 m Valor asumido.

$$\text{Número de Longitudinales} = \frac{a}{Y} - 1$$

$$\text{Número de Longitudinales} = \frac{16}{4} - 1$$

Número de Juntas Longitudinales = 3 Unidades

Longitud necesaria de junta = 3 x 1000 m

Longitud necesaria de junta = 3000 m

6.7.4.4. Cálculo del acero transversal.

Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la barra de amarre son las del siguiente cuadro:

SEPARACIÓN EN cm, SEGÚN LA DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE						
ESPESOR PAVIMENTO cm	DIÁMETRO mm	LONGITUD cm	DISTANCIA AL EXTREMO LIBRE			
			3.05 m	3.66 m	4.27 m	7.32 m
≤ 14.00	12	64	76	76	76	64
14.00 - 18.00	12	71	76	76	76	51
18.00 - 21.60	16	79	76	76	71	41
21.60 - 25.40	16	81	91	91	91	56
25.40 - 30.50	16	91	91	91	91	46

De acuerdo al espesor calculado se va colocar una varilla $\phi 12@ 76$ cm con una longitud de 71 cm.

Longitud de estudio (L) = 1000 m

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{L}{\text{Separación}}$$

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{1000}{0,76} + 1$$

de varillas necesarias = 1 317 Unidades

Longitud necesaria de varilla = 1 317 x 0,71 m x 3 juntas longitudinales.

Longitud necesaria de varilla = 2 805 m

Peso de varilla necesaria = 2 805 m x 0,888

Peso de varilla necesaria = 2 491 kg

6.7.4.5. Cálculo del acero longitudinal.

ESPESOR DE LOSA		BARRAS PASAJUNTAS					
		DIÁMETRO		LONGITUD		SEPARACIÓN	
cm	plg	mm	plg	cm	plg	cm	plg
13 a 15	5 a 6	20	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1¾	56	22	46	18

Partiendo del espesor de la losa, podemos escoger el diámetro, longitud y la separación de las varillas longitudinales.

Se va colocar una varilla $\varnothing 25 @ 30$ cm con una longitud de 46 cm.

Ancho de estudio (a) = 16 m

$$\# \text{ de varillas necesarias} = \frac{a}{S}$$

$$\# \text{ de Juntas transversales} = \frac{16}{0,30} + 1$$

de Juntas transversales = 54 Unidades

Longitud necesaria de varilla = 54 x 0,46 m x 249 juntas transversales.

Longitud necesaria de varilla = 6223 m

Peso de varilla necesaria = 6223m x 3,853

Peso de varilla necesaria = 23 981 kg

Resumen de cantidades:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	HORMIGÓN CONVENCIONAL	HORMIGÓN MODIFICADO
Espesor calculado	m	0,19	0,15
Capa de hormigón	m ³	3040	2400
Capa de sub-base clase 2	m ³	2400	2400
Número de juntas transversales	U	199	249
Longitud de junta transversal (sentido Y)	m	3184	3984
Número de juntas longitudinal	U	3	3
Longitud de junta longitudinal (sentido X)	m	3000	3000
Acero transversal	kg	5271	2491
Acero longitudinal	kg	19165	23981

6.7.5. Análisis comparativo de costos.

El objetivo principal es realizar el análisis de precios unitarios, con lo cual se procederá a comparar el costo de producción del pavimento rígido con hormigón convencional y hormigón modificado (adición 2% del polímero elástico). Están diseñadas para las mismas condiciones de suelo y tráfico.

La longitud del proyecto fue de 1km con un ancho de 16 m, para el cálculo de las cantidades de obra y análisis de costos. Las mismas condiciones para el pavimento rígido con hormigón convencional y hormigón modificado.

6.7.5.1. Costo Unitario para el pavimento rígido con Hormigón convencional.

Presupuesto de acuerdo a las especificaciones establecidas para una longitud de 1 km y ancho 16 m de análisis.

TABLA DE CANTIDADES Y PRECIOS

INSTITUCION: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ÓPTIMA DE POLÍMERO ELÁSTICO PARA UN HORMIGÓN MODIFICADO DE 28 Mpa Y SU INFLUENCIA EN ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES

UBICACION: RIOBAMBA

ELABORADO: LUIS PILAMUNGA Y RAÚL GUAMAN

FECHA: 18 DE MARZO DE 2016

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS					
RUBRO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	P.TOTAL
OBRA BÁSICA O PLATAFORMA					
001	DESBROCE, DESBOSQUE Y LIMPIEZA	Ha	2,36	193,10	455,72
002	REMOCIÓN Y DESALOJO DE VIVIENDAS	m3	495,70	10,29	5.100,75
003	REPLANTEO Y NIVELACIÓN CON EQUIPO TOPOGRÁFICO	km	1,00	2.597,32	2.597,32
004	EXCAVACIÓN EN SUELO SIN CLASIFICAR	m3	157.149,36	1,35	212.151,64
005	RELLENO CON MATERIAL DE PRÉSTAMO LOCAL	m3	34.873,25	7,63	266.082,90
PAVIMENTO RÍGIDO					
006	SUB-BASE CLASE 2	m3	2.400,00	25,68	61.632,00
007	PAVIMENTO DE HORMIGÓN CLASE "A", F'C=280 KG/CM2	m3	3.040,00	121,59	369.633,60
008	ACERO DE REFUERZO PARA UNIÓN, D=16MM,FY=4200KG/CM2	kg	5.271,00	2,29	12.070,59
009	ACERO DE REFUERZO EN PASADORES, D=25MM,FY=4200KG/CM2	kg	19.165,00	2,29	43.887,85
010	CURADOR	m2	16.000,00	3,37	53.920,00
011	JUNTAS SIMULADAS	m	6.184,00	1,75	10.822,00
012	HORMIGÓN SIMPLE PARA BORDILLOS Y PARTERRE, F'C=180KG/CM2	m	1.196,16	98,63	117.977,26
013	HORMIGÓN SIMPLE F'C=180 KG/CM2 (CUNETAS)	m3	11,36	98,63	1.120,44
TOTAL:					1.157.452,07

SON : UN MILLÓN CIENTO CINCUENTA Y SIETE MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA Y DOS, 07/100 DÓLARES

LUIS PILAMUNGA Y RAÚL GUAMAN
ELABORADO
LIC. PROF.: CI

RIOBAMBA, 18 DE MARZO DE 2016

6.7.5.2. Costo Unitario para el pavimento rígido con Hormigón Modificado.

Presupuesto de acuerdo a las especificaciones establecidas para una longitud de 1 km y ancho 16 m de análisis.

TABLA DE CANTIDADES Y PRECIOS

INSTITUCION: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ÓPTIMA DE POLÍMERO ELÁSTICO PARA UN HORMIGÓN MODIFICADO DE 28 Mpa Y SU INFLUENCIA EN ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES

UBICACION: RIOBAMBA

ELABORADO: LUIS PILAMUNGA Y RAÚL GUAMAN

FECHA: 18 DE MARZO DE 2016

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS					
RUBRO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	P.TOTAL
OBRA BÁSICA O PLATAFORMA					
001	DESBROCE, DESBOSQUE Y LIMPIEZA	Ha	2,36	193,10	455,72
002	REMOCIÓN Y DESALOJO DE VIVIENDAS	m3	495,70	10,29	5.100,75
003	REPLANTEO Y NIVELACIÓN CON EQUIPO TOPOGRÁFICO	km	1,00	2.597,32	2.597,32
004	EXCAVACIÓN EN SUELO SIN CLASIFICAR	m3	157.149,36	1,35	212.151,64
005	RELLENO CON MATERIAL DE PRÉSTAMO LOCAL	m3	34.873,25	7,63	266.082,90
PAVIMENTO RÍGIDO					
006	SUB-BASE CLASE 2	m3	2.400,00	25,68	61.632,00
007	PAVIMENTO DE HORMIGÓN CLASE "A", F'C=280 KG/CM2	m3	2.400,00	121,77	292.248,00
008	ACERO DE REFUERZO PARA UNIÓN, D=12MM,FY=4200KG/CM2	kg	2.491,00	2,29	5.704,39
009	ACERO DE REFUERZO EN PASADORES, D=25MM,FY=4200KG/CM2	kg	23.981,00	2,29	54.916,49
010	CURADOR	m2	16.000,00	3,37	53.920,00
011	JUNTAS SIMULADAS	m	6.984,00	1,75	12.222,00
012	HORMIGÓN SIMPLE PARA BORDILLOS Y PARTERRE, F'C=180KG/CM2	m	1.196,16	98,63	117.977,26
013	HORMIGÓN SIMPLE F'C=180 KG/CM2 (CUNETAS)	m3	11,36	98,63	1.120,44
TOTAL:					1.086.128,91

SON : UN MILLÓN OCHENTA Y SEIS MIL CIENTO VEINTE Y OCHO, 91/100 DÓLARES

LUIS PILAMUNGA Y RAÚL GUAMAN
ELABORADO
LIC. PROF.: CI

RIOBAMBA, 18 DE MARZO DE 2016

6.7.5.3. Comparación de costos.

Según el presupuesto para el:

Pavimento rígido con Hormigón convencional = 1'157,452.07 Dólares

Pavimento rígido con Hormigón modificado = 1'086,128.91 Dólares

Con una diferencia de 71 323.16 Dólares. Con un 6% de reducción.

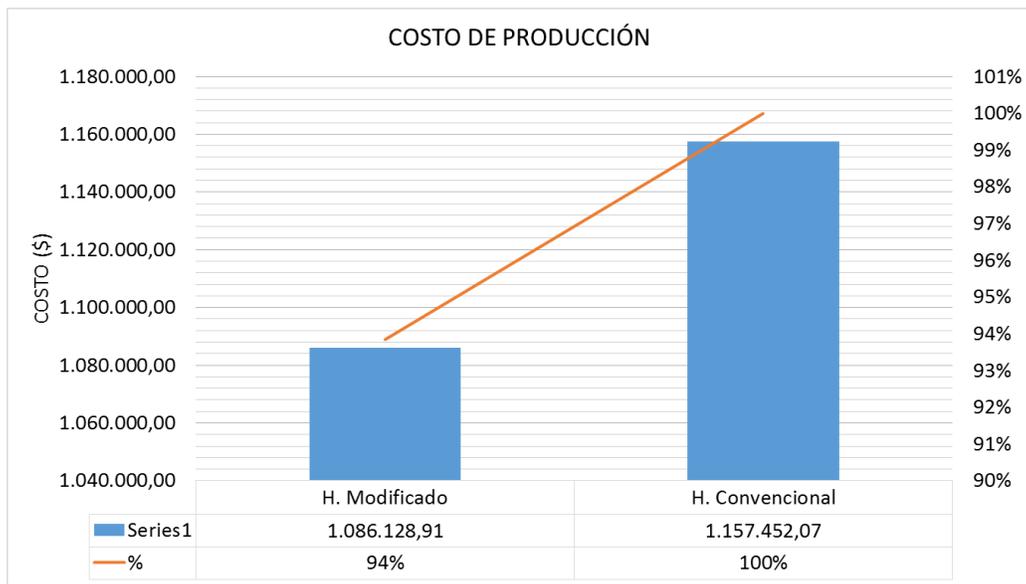


Ilustración 85.- Comparación de costos del pavimento rígido con hormigón convencional y modificado.

Las diferencias de costos más relevantes se evidenciaron en el hormigón del pavimento rígido y en el acero de refuerzo para las uniones.



CAPÍTULO VII

7. BIBLIOGRAFÍA

- A., R. L. (2012). ANALISIS MESOMECANICO DEL FENOMENO DE ADHERENCIA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 18.
- Adam, M. (1975). *Aspectos del hormigón*. Francia: Societe de Difussion des techniques.
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Bravo, J., & H., G. (2008). Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 67-75.
- Bowles, J. (2006). *Manual de Laboratorio de Suelos*. Hill México: Editorial. Mc Graw.
- C1017, A. (2013). *Especificación para aditivos químicos utilizados en la elaboración de hormigón fluido*. ASTM.
- Carrasco, I. P. (2006). Hormigón con caucho: determinación del módulo de elasticidad. Valdivia, Chile: Tesis para optar al Título de Constructor Civil.
- Castellanos, P. R. (2003). *Desarrollo Sostenible y medio Ambiente*. Salamanca: Printed in Spain.
- Castellanos, P. R. (2005). *Gestión del medio Ambiente*. Salamanca: Printed in Spain.
- Castro, G. (2008). *Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático*. Argentina: Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Concreto, I. E. (2009). Control de Calidad en el Hormigón. *INECYC*, 15.
- Cordova, M. A. (2009). Estudio d la utilización como combustible alternativo y Plan de disposición final de los neumáticos. *Ciencias*, 119.
- Ibeth, G. (2015). Evaluación del pavimento Flexible de la Via Calpi – San Juan. *UNACH*, 344.
- INEN 872, N. E. (1982-12). Aridos para Hormigones. *Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN*, 21.
- INVEC. (31 de Agosto de 2015). *Plataforma de información competitiva de Cuenca*. Obtenido de Plataforma de información competitiva de Cuenca: www.invec.com
- Kraemer, C. (1929). Ingeniería de Carreteras. *Ingeniería de Carreteras Volumen II Primera Edición*.
- Martínez Barrera, G., Bosco, J., & López Lara, T. (2015). *Materiales sustentables y Reciclados en la Construcción*. Mexico: Omnia Publisher SL.
- Montero, P. K. (1986). *Hormigón*.

- MOP-001-F. (2002). *Especificaciones Generales Para la Construcción De Caminos y Puentes*. Quito: Republica del Ecuador Ministerio de obras Publicas Y Comunicación.
- Mora, S. (1998). Pavimento de concreto Hidráulico. *ASOCEM*, 130.
- Neumático, P. d. (22 de Septiembre de 2015). *Planta de producción de neumático*. Obtenido de www.turnkey.taiwantrade.com.tw
- Normalización, I. E. (2010). *Determinación de la Resistencia a la Compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento Hidráulico*. Quito: NTE INEN 1573.
- Officials, A. A. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. *AASHTO*, 26.
- Olivares, F. H. (2004). Hormigón con fibras de caucho de recuperación de neumaticos usados y de propileno diseño del firme de hormigón de caucho. *Congreso Nacional de Firmes*, 15.
- Ospina, H. A. (2014). Valoración de Propiedades mecánicas y de Durabilidad de Concreto Adicionado con residuos de llantas de Caucho. Bogotá, Colombia: Maestría en Ingeniería Civil.
- Reyes, F. E. (2008). ADHERENCIA ENTRE BARRAS DE ACERO Y CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES Y CONVENCIONALES SOMETIDOS A CARGAMENTOS CÍCLICOS Y MONOTÓNICOS. *Science & Engineering Journal*, 10.
- Romero, L. (18 de Noviembre de 2015). *Buenas Tareas*. Obtenido de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Resistencia-a-La-Tracci%C3%B3n-Por-ompresi%C3%B3n/25110881.html>.
- Venezuela, F. d. (2008). *Facultad de Ingeniería . U. Central de Venezuela v.23 n.*