



T
624.1834
VEL

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Propiedades mecánicas de un diseño de hormigón compactado
con pavimentadora y Fast Track trabajando en conjunto”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Cristian Alejandro Velasco Ochoa



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2005

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Hugo Egüez Alava
Director de Tesis por su aporte
valioso en la realización de este
trabajo e invaluable ayuda en
todo momento, y a las personas
que integran el Centro Técnico
del Hormigón quienes de uno u
otro modo colaboraron en el
desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

Gracias a Dios por todas sus bendiciones y por ayudarme culminar con felicidad una etapa más en mi vida.

A mis padres, quienes han sido mi guía con su ejemplo y cuyo esfuerzo me ha permitido alcanzar este propósito.

A mis hermanas por estar conmigo en todo momento.

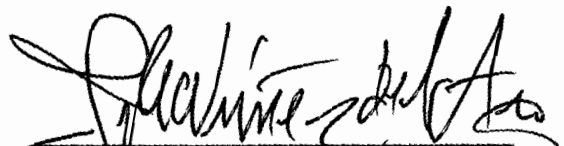


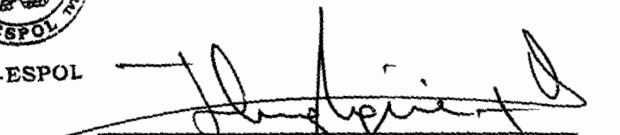
CIB-ESPOL

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



CIB-ESPOL


Ing. Eugenio Nuñez Del Arco.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL


Ing. Hugo Egoz Alava
DIRECTOR DE TESIS



CIB-ESPOL

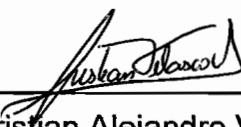

Ing. José Camposano L.
VOCAL


Ing. Eduardo Santos B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Cristian Alejandro Velasco Ochoa

RESUMEN

El presente trabajo trata acerca de las propiedades mecánicas de un diseño de hormigón compactado con pavimentadora y fast track trabajando como un solo elemento, este sistema constructivo surge ante la necesidad de aprovechar las bondades del hormigón compactado, ya que este permite obtener altas resistencias con un bajo contenido de cemento, lo cual significa máxima economía, sin embargo por su textura no es posible utilizarlo en vías de tráfico rápido y pesado, por esta razón se diseñó un hormigón combinado utilizando HCP con un contenido de cemento de 250 kg/m^3 y una relación a/c de 0,41 y una capa de Fast Track con un contenido de cemento de 450 kg/m^3 y una relación a/c de 0,29 que puede ser texturizable permite poner en servicio el pavimento en un corto plazo, sin que esto implique un mayor aumento en el costo del mismo. A partir de esto se elaboró especímenes para determinar sus propiedades mecánicas y comportamiento estructural mediante ensayos de laboratorio y pruebas de campo, donde se comprobó con resultados satisfactorios, la factibilidad del método constructivo, las excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción, flexión, módulo de elasticidad, retracción) de los




elementos en estudios tanto de manera individual como su comportamiento trabajando en conjunto, haciendo énfasis en estudios analíticos y experimentales a nivel de la interfase HCP-FT garantizando una perfecta adherencia entre estas dos capas.

Es importante resaltar que los beneficios que ofrece el HCP+FT no sólo se encuentra en sus características mecánicas, sino también en el aspecto económico ya que su costo de colocación en obra es muy competitivo con respecto a otras propuestas, brindando a la comunidad una alternativa económica y eficiente que se puede implementar para mejorar el desarrollo vial de nuestro país.



CIB-ESPOL

ÍNDICE GENERAL

		Pág.
RESUMEN.....		II
ÍNDICE GENERAL.....	CIB-ESPOL	III
ABREVIATURAS.....		IV
SIMBOLOGÍA.....		V
ÍNDICE DE FIGURAS.....		VI
ÍNDICE DE TABLAS.....		VII
CAPÍTULO 1		
1. INTRODUCCIÓN.....		1
1.1 Antecedentes.....	CIB-ESPOL	2
1.2 Objetivos.....		4
CAPÍTULO 2		
2. EL HORMIGÓN COMPACTADO CON PAVIMENTADORA Y EL FAST TRACK TRABAJANDO EN CONJUNTO.....		5
2.1 Proceso Constructivo.....		5
2.1.1 Colocación de la capa de HCP.....	CIB-ESPOL	5

2.1.1.1 Trabajos Previos.....	5
2.1.1.2 Provisión del hormigón.....	6
2.1.1.3 Construcción de maestras de hormigón.....	7
2.1.1.4 Tendido de la Capa de HCP.....	8
2.1.1.5 Determinación del porcentaje de compactación.	8
2.1.1.6 Rodillado para compactación final.....	9
2.1.1.7 Corte de Juntas para HCP.....	10
2.1.2 Colocación de la Capa de Fast Track.....	10
2.1.2.1 Provisión del Fast Track.....	10
2.1.2.2 Tendido de la Capa de Fast Track.....	11
2.1.2.3 Acabado y curado de Fast Track.....	12
2.1.2.4 Corte y Relleno de las Juntas del FT.....	13
2.2 Ventajas.....	16
2.3 Usos.....	16



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 3

3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

COMPACTADO CON PAVIMENTADORA Y EL "FAST TRACK"....	21
3.1 Características Mecánicas del HCP.....	21
3.1.1 Resistencia a la Compresión del HCP.....	21
3.1.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del HCP.....	22

2.1.1.1 Trabajos Previos.....	5
2.1.1.2 Provisión del hormigón.....	6
2.1.1.3 Construcción de maestras de hormigón.....	7
2.1.1.4 Tendido de la Capa de HCP.....	8
2.1.1.5 Determinación del porcentaje de compactación.	8
2.1.1.6 Rodillado para compactación final.....	9
2.1.1.7 Corte de Juntas para HCP.....	10
2.1.2 Colocación de la Capa de Fast Track.....	10
2.1.2.1 Provisión del Fast Track.....	10
2.1.2.2 Tendido de la Capa de Fast Track.....	11
2.1.2.3 Acabado y curado de Fast Track.....	12
2.1.2.4 Corte y Relleno de las Juntas del FT.....	13
2.2 Ventajas.....	16
2.3 Usos.....	16



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 3

3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

COMPACTADO CON PAVIMENTADORA Y EL "FAST TRACK"....	21
3.1 Características Mecánicas del HCP.....	21
3.1.1 Resistencia a la Compresión del HCP.....	21
3.1.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del HCP.....	22

3.1.3 Resistencia a la flexión del HCP.....	22
3.1.4 Módulo de elasticidad del HCP.....	23
3.1.5 Retracción por secado del HCP.....	23
3.1.6 Otras propiedades.....	23
3.2 Características Mecánicas del Fast Track.....	23
3.2.1 Resistencia a la Compresión del Fast Track.....	23
3.2.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del Fast Track.....	24
3.2.3 Resistencia a la flexión del Fast Track.....	24
3.2.4 Módulo de elasticidad del Fast Track.....	24
3.2.5 Retracción por secado del Fast Track.....	24
3.3 Características Mecánicas del HCP+FT.....	25
3.3.1 Resistencia a la flexión del HCP+FT.....	25
3.3.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del HCP+FT.....	25
3.3.3 Otras características del HCP+FT.....	25

CAPÍTULO 4

4. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	26
4.1 Materiales utilizados.....	27
4.1.1 Materiales empleados en el HCP.....	27
4.1.1.1 Cemento.....	27

4.1.1.2	Agregados.....	28
4.1.1.3	Aditivos.....	29
4.1.1.4	Agua.....	30
4.1.2	Materiales empleados en el Fast Track.....	31
4.1.2.1	Cemento.....	31
4.1.2.2	Adiciones.....	32
4.1.2.3	Agregados.....	32
4.1.2.4	Aditivos.....	34
4.1.2.5	Agua.....	35
4.2	Metodología Empleada.....	36
4.2.1	Pruebas de Granulometría (ASTM C136-01).....	36
4.2.1.1	Objetivo.....	36
4.2.1.2	Equipos utilizados.....	36
4.2.1.3	Procedimiento.....	37
4.2.2	Condiciones de humedad de los agregados.....	39
4.2.2.1	Secado al aire.....	39
4.2.2.2	Saturado superficialmente seco.....	40
4.2.3	Pruebas Proctor (ASTM D1557-02).....	43
4.2.3.1	Objetivo.....	43
4.2.3.2	Equipos utilizados.....	43
4.2.3.3	Procedimiento.....	46
4.2.4	Preparación de mezclas de hormigón.....	49



CIB-ESPOL



4.2.4.1 Procedimiento para mezclado del HCP.....	CIB-ESPOL	49
4.2.4.2 Procedimiento para mezclado del Fast Track.....		52
4.2.5 Elaboración en laboratorio de muestras de hormigón....		59
4.2.5.1 Elaboración de especímenes de HCP.....		61
4.2.5.2 Elaboración de Especímenes de Fast Track.....		68
4.2.5.3 Elaboración de Especímenes de HCP + FT.....		72
4.2.6 Elaboración de Ensayos.....		75
4.2.6.1 Ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-03).....		75
4.2.6.2 Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496/C496M-04).....		78
4.2.6.3 Ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C78-02)..		81
4.2.6.4 Ensayo de módulo de elasticidad (ASTM 469-02)...		84
4.2.6.5 Ensayo de retracción por secado (ASTM C157 /C157M-04).....		87
4.2.6.6 Ensayo del martillo de rebote o esclerometría (ASTM C805-02).....		91
4.2.6.7 Ensayo de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02).....		94

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS.....		97
--------------------	--	----



5.1 Resultados de los ensayos de granulometría(ASTM C136-01).	98
5.1.1 Granulometría piedra caliza No. 7 - TM. 12 mm.....	98
5.1.2 Granulometría piedra caliza No. 67 - TM. 19 mm.....	99
5.1.3 Granulometría arena de trituración homogenizada.....	100
5.1.4 Granulometría arena natural de río.....	101
5.2 Resultados de los ensayos proctor (ASTM D1557).....	102
5.2.1 Resultados del ensayo proctor utilizando 30% de arena de trituración.....	102
5.2.2 Resultados del ensayo proctor utilizando 35% de arena de trituración.....	104
5.2.3 Resultados del ensayo proctor utilizando 40% de arena de trituración.....	106
5.2.4 Resultados del ensayo proctor utilizando 50% de arena de trituración.....	108
5.2.5 Resultados del ensayo proctor utilizando 55% de arena de trituración.....	110
5.3 Resultados de los ensayos de caracterización del HCP.....	112
5.3.1 Resultados del ensayo de compresión simple (ASTM C39-03) en muestras de HCP a distantes edades.....	112
5.3.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en muestras de HCP a distantes edades.....	113



5.3.3 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de HCP.....	114
5.3.4 Resultados del ensayo módulo de elasticidad. (ASTM C 469-02) del HCP.....	114
5.3.5 Resultados del ensayo de retracción por secado (ASTM C157-04) en muestras de HCP.....	117
5.3.6 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en muestras de HCP 150 x 300 mm. a distintas edades.....	118
5.3.7 Resultados del ensayo de rebote esclerométrico (ASTM C 805-02) en muestras de HCP.....	119
5.4 Resultados de los ensayos de caracterización del FT.....	120
5.4.1 Resultados del ensayo de compresión simple (ASTM C39-03) en muestras de FT a distantes edades.....	120
5.4.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en muestras de FT a distantes edades.....	121
5.4.3 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de FT.....	123
5.4.4 Resultados del ensayo módulo de elasticidad. (ASTM C 469-02) del FT.....	123
5.4.5 Resultados del ensayo de retracción por secado (ASTM	

C157-04) en muestras de FT.....	126
5.4.6 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en muestras de FT 100x200mm. a distintas edades.....	127
5.5 Resultados de los ensayos de caracterización del HCP+FT....	129
5.5.1 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de HCP+FT a distintas edades.....	129
5.5.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en núcleos calados en vigas de HCP+FT a distintas edades.....	129
5.5.3 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en vigas de HCP+FT.....	130

CAPÍTULO 6



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	131
6.1 Análisis de los resultados obtenidos en el HCP.....	131
6.1.1 Justificación de las combinaciones granulométricas usadas en los ensayos proctor	131
6.1.2 Selección del porcentaje óptimo de arena de trituración...	132
6.1.3 Obtención del diseño final del HCP.....	135
6.2 Análisis de los ensayos obtenidos en el HCP+FT.....	137
6.2.1 Obtención del diseño final del FT.....	137

6.3	Análisis de los ensayos obtenidos en el HCP+FT.....	138
6.3.1	Análisis de la adherencia en la interfase HCP+FT mediante ensayos destructivos.....	138
6.3.2	Análisis de los esfuerzos tangenciales en la interfase producidos por diferenciales de retracción.....	142
6.3.3	Análisis de los esfuerzos generados por gradientes térmicos en la interfase HCP+FT.....	144
6.3.4	Análisis de los resultados obtenidos mediante mediante el ensayo de ultrasonido en el HCP+FT.....	145
6.3.5	Relación entre el Módulo de Rotura y la prueba de tracción por compresión diametral.....	146
6.3.6	Estudio económico de la solución HCP+FT.....	148
CAPÍTULO 7		
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
	BIBLIOGRAFÍA.....	153



CIB-ESPOL

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 2.1	Ubicación de las maestras de confinamiento..... 7
FIGURA 2.2	Colocación de la capa de HCP..... 8
FIGURA 2.3	Control de la densidad de la capa de HCP..... 8
FIGURA 2.4	Compactación con rodillo vibratorio..... 9
FIGURA 2.5	Aserrado de juntas en la capa de HCP..... 10
FIGURA 2.6	Colocación de la capa de Fast Track..... 11
FIGURA 2.7	Texturizado y curado la capa de Fast Track..... 13
FIGURA 2.8	Corte de Juntas en la capa de Fast Track..... 14
FIGURA 2.9	Esquema gráfico del procedimiento constructivo HCP+FT..... 15
FIGURA 2.10	Colocación de la capa de HCP..... 18
FIGURA 2.11	Colocación de la capa de FT..... 19
FIGURA 2.12	Trabajos complementarios y puesta en servicio..... 20
FIGURA 4.1	Muestra de los agregados Finos y Gruesos..... 29
FIGURA 4.2	Aditivo POLYHEED RI..... 30
FIGURA 4.3	Zeolita molida..... 32
FIGURA 4.4	Muestra de Agregados Finos..... 33
FIGURA 4.5	Muestra de Agregados Gruesos..... 34
FIGURA 4.6	Aditivo HIPERMIX..... 34
FIGURA 4.7	Tamizadoras mecánicas para agregados..... 37
FIGURA 4.8	Balanza para determinar pesos retenidos..... 38
FIGURA 4.9	Secado al aire de agregados para HCP..... 39
FIGURA 4.10	Secuencia de saturación superficialmente seca de agregados..... 42
FIGURA 4.11	Vista frontal de un molde metálico..... 44
FIGURA 4.12	Dimensiones del molde metálico..... 44
FIGURA 4.13	Dimensiones del martillo metálico..... 45
FIGURA 4.14	Horno para secado de muestras..... 46
FIGURA 4.15	Muestras depositadas en fundas plásticas..... 47
FIGURA 4.16	Procedimiento de Compactación ASTM D1557-02..... 48
FIGURA 4.17	Cemento y Agregados para mezcla del HCP..... 50

FIGURA 4.18	Pesaje del Aditivo POLYHEED RI.....	50
FIGURA 4.19	Mezcladora de artesa.....	51
FIGURA 4.20	Mezclado del HCP.....	52
FIGURA 4.21	Cemento, Agregados, Zeolita y Agua para mezcla del FT.....	53
FIGURA 4.22	Pesaje del aditivo HIPERMIX.....	53
FIGURA 4.23	Mezcladora Basculante.....	54
FIGURA 4.24	Mezcla de Agregados del Fast Track.....	55
FIGURA 4.25	Efecto del aditivo sobre la mezcla del Fast Track.....	56
FIGURA 4.26	Elementos utilizados en la prueba de fluidez.....	57
FIGURA 4.27	Procedimiento de llenado del molde.....	58
FIGURA 4.28	Extensión del hormigón sobre la mesa de flujo.....	58
FIGURA 4.29	Molde metálico de 150 x 300 mm.....	59
FIGURA 4.30	Molde metálico de 100 x 200 mm.....	60
FIGURA 4.31	Molde metálico viga 150 x 150 x 500 mm.....	60
FIGURA 4.32	Molde metálico vigueta 100 x 100 x 285 mm.....	61
FIGURA 4.33	Martillo eléctrico de compactación.....	62
FIGURA 4.34	Procedimiento ASTM C1435-99 de Compactación de cilindros.....	63
FIGURA 4.35	Procedimiento de llenado de vigas.....	64
FIGURA 4.36	Martillo eléctrico KANGO.....	65
FIGURA 4.37	Moldes asegurados con bandas de caucho.....	65
FIGURA 4.38	Elaboración de viguetas de retracción.....	66
FIGURA 4.39	Secuencia de desencofrado y almacenamiento de muestras.....	67
FIGURA 4.40	Procedimiento de llenado de cilindros de FT.....	69
FIGURA 4.41	Proceso de elaboración de vigas de FT.....	70
FIGURA 4.42	Viguetas de retracción con Fast Track.....	71
FIGURA 4.43	Llenado de viga con HCP.....	73
FIGURA 4.44	Capa superior de FT sobre el HCP.....	74
FIGURA 4.45	Prensa "ELE" 3000 kN.....	76
FIGURA 4.46	Procedimiento de rotura (ASTM C39) de muestras de HCP y FT.....	77
FIGURA 4.47	Platina de apoyo suplementaria.....	79
FIGURA 4.48	Colocación del cilindro de FT en la platina.....	79
FIGURA 4.49	Procedimiento de rotura (ASTM C496) de muestras de HCP, FT y núcleos HCP+FT.....	80
FIGURA 4.50	Equipo utilizado con prensa "ELE" 3000 kN.....	82
FIGURA 4.51	Procedimiento de rotura (ASTM C78-02) de vigas de HCP, FT y HCP+FT.....	83
FIGURA 4.52	Deformímetro empleado para determinar el módulo de elasticidad.....	85
FIGURA 4.53	Procedimiento de ensayo (ASTM 469-02) de módulo de elasticidad en muestras de HCP y FT.....	86



FIGURA 4.54	Deformímetro conveniente para medida de cambios de longitud.....	88
FIGURA 4.55	Procedimiento de Lecturas (ASTM C157) de muestras de HCP y FT.....	89
FIGURA 4.56	Almacenamiento de muestras en ambiente seco.....	89
FIGURA 4.57	Martillo esclerométrico DIGI SCHMIDT 2000.....	92
FIGURA 4.58	Procedimiento de ensayo de esclerometría (ASTM C805) en HCP.....	92
FIGURA 4.59	Aparato de velocidad de pulso TICO.....	95
FIGURA 4.60	Aplicación de grasa en la superficie de HCP.....	95
FIGURA 4.61	Aplicación del ensayo de velocidad de pulso (ASTM C597-02) en una muestra de HCP.....	96
FIGURA 5.1	Curva granulométrica piedra caliza No. 7.....	98
FIGURA 5.2	Curva granulométrica piedra caliza No.67.....	99
FIGURA 5.3	Curva granulométrica de arena de trituración.....	100
FIGURA 5.4	Curva granulométrica de arena de natural de río.....	101
FIGURA 5.5	Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 30% arena de trituración.....	102
FIGURA 5.6	Curva densidad máx. vs. % humedad con 30% de arena de trituración.....	103
FIGURA 5.7	Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 35% arena de trituración.....	104
FIGURA 5.8	Curva densidad máx. vs. % humedad con 35% de arena de trituración.....	105
FIGURA 5.9	Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 40% arena de trituración.....	106
FIGURA 5.10	Curva densidad máx. vs. % humedad con 40% de arena de trituración.....	107
FIGURA 5.11	Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 50% arena de trituración.....	108
FIGURA 5.12	Curva densidad máx. vs. % humedad con 50% de arena de trituración.....	109
FIGURA 5.13	Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 55% arena de trituración.....	110
FIGURA 5.14	Curva densidad máx. vs. % humedad con 55% de arena de trituración.....	111
FIGURA 5.15	Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP.....	112
FIGURA 5.16	Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP.....	113
FIGURA 5.17	Curva esfuerzo – deformación para el HCP.....	115
FIGURA 5.18	Curva esfuerzo – deformación para el HCP.....	116
FIGURA 5.19	Cambio de longitud del HCP expuesto a secado.....	117
FIGURA 5.20	Desarrollo de la velocidad del pulso en HCP.....	118
FIGURA 5.21	Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP.....	121
FIGURA 5.22	Desarrollo de resistencia obtenida por el FT.....	122

FIGURA 5.23	Curva esfuerzo – deformación para el FT.....	124
FIGURA 5.24	Curva esfuerzo – deformación para el FT.....	125
FIGURA 5.25	Cambio de longitud del FT expuesto a secado.....	127
FIGURA 5.26	Desarrollo de la velocidad del pulso en FT	128
FIGURA 5.27	Desarrollo de resistencia obtenida en núcleos de HCP+FT.....	130
FIGURA 6.1	Resumen comparativo de curvas de ensayos proctor...	132
FIGURA 6.2	Cuadro comparativo densidad máx. vs. % arena	133
FIGURA 6.3	Cuadro comparativo humedad óptima vs. % arena.....	134
FIGURA 6.4	Tramo pavimentado con HCP en la ciudad de Milagro..	135
FIGURA 6.5	Muestras ensayadas soportaron la rotura sin mostrar desprendimiento en la interfase.....	138
FIGURA 6.6	Aplicación de cargas en ensayo de tracción por compresión diametral y tracción por flexión.....	139
FIGURA 6.7	Ultrasonido en viga de HCP+FT en estado seco y saturado.....	145



CIB-ESPOL

ÍNDICE DE TABLAS



CIB-ESPOL

Pág.

TABLA 4.1	Características Físicas del cemento Pórtland IP(HE).....	28
TABLA 4.2	Características Físicas del cemento Pórtland tipo I.....	31
TABLA 5.1	Resultado de granulometría piedra caliza No.7.....	98
TABLA 5.2	Resultado de granulometría piedra caliza No.67.....	99
TABLA 5.3	Resultado de granulometría de arena de trituración.....	100
TABLA 5.4	Resultado de granulometría de arena natural de río.....	101
TABLA 5.5	Dosificación – 30% arena de trituración.....	102
TABLA 5.6	Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 30% de arena de trituración.....	103
TABLA 5.7	Dosificación – 35% arena de trituración.....	104
TABLA 5.8	Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 35% de arena de trituración.....	105
TABLA 5.9	Dosificación – 40% arena de trituración.....	106
TABLA 5.10	Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 40% de arena de trituración.....	107
TABLA 5.11	Dosificación – 50% arena de trituración.....	108
TABLA 5.12	Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 50% de arena de trituración.....	109
TABLA 5.13	Dosificación – 55% arena de trituración.....	110
TABLA 5.14	Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 55% de arena de trituración.....	111
TABLA 5.15	Resultados de compresión simple en HCP – 3 días.....	112
TABLA 5.16	Resultados de compresión simple en HCP – 7 días.....	112
TABLA 5.17	Resultados de compresión simple en HCP – 28 días.....	112
TABLA 5.18	Resultados de T.C.D. en HCP – 3 días.....	113
TABLA 5.19	Resultados de T.C.D. en HCP – 7 días.....	113
TABLA 5.20	Resultados de T.C.D. en HCP – 28 días.....	113
TABLA 5.21	Resultados del ensayo a flexión en HCP – 28 días.....	114
TABLA 5.22	Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad.....	114
TABLA 5.23	Resultados del ensayo módulo de elasticidad del HCP...	114
TABLA 5.24	Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo deformación.....	115

TABLA 5.25	Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad.....	115
TABLA 5.26	Resultados del ensayo módulo de elasticidad del HCP...	116
TABLA 5.27	Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo deformación.....	116
TABLA 5.28	Resultados ensayo de retracción por secado del HCP....	117
TABLA 5.29	Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP – 3 días...	118
TABLA 5.30	Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP – 7 días...	118
TABLA 5.31	Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP–28 días...	118
TABLA 5.32	Resultados del ensayo de rebote esclerométrico en HCP-28 días.....	119
TABLA 5.33	Resultados de compresión simple en FT – 1 días.....	120
TABLA 5.34	Resultados de compresión simple en FT – 3 días.....	120
TABLA 5.35	Resultados de compresión simple en FT – 7 días.....	120
TABLA 5.36	Resultados de compresión simple en FT – 14 días.....	120
TABLA 5.37	Resultados de compresión simple en FT – 28 días.....	120
TABLA 5.38	Resultados de T.C.D. en FT – 1 días.....	121
TABLA 5.39	Resultados de T.C.D. en FT – 3 días.....	121
TABLA 5.40	Resultados de T.C.D. en FT – 7 días.....	121
TABLA 5.41	Resultados de T.C.D. en FT – 14 días.....	122
TABLA 5.42	Resultados de T.C.D. en FT – 28 días.....	122
TABLA 5.43	Resultados del ensayo a flexión en FT – 14 días.....	123
TABLA 5.44	Resultados del ensayo a flexión en FT – 28 días.....	123
TABLA 5.45	Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad.....	123
TABLA 5.46	Resultados del ensayo módulo de elasticidad del FT.....	123
TABLA 5.47	Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo deformación.....	124
TABLA 5.48	Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad.....	124
TABLA 5.49	TABLA 5.49 Resultados del ensayo módulo de elasticidad del FT.....	124
TABLA 5.50	Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo deformación.....	125
TABLA 5.51	Resultados ensayo de retracción por secado del FT.....	126
TABLA 5.52	Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 1 día.....	127
TABLA 5.53	Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 3 días.....	127
TABLA 5.54	Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 7 días.....	128
TABLA 5.55	Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 28 días....	128
TABLA 5.56	Resultados del ensayo a flexión en HCP+FT.....	129
TABLA 5.57	Resultados del ensayo a flexión en HCP+FT en posición invertida a la colocación de moldeo.....	129
TABLA 5.58	Resultados de núcleos de HCP+FT ensayados a TCD....	129
TABLA 5.59	Resultados del ensayo de ultrasonido en muestra	

	HCP+FT en condición seca.....	130
TABLA 5.60	Resultados del ensayo de ultrasonido en muestra HCP+FT en condición saturada.....	130
TABLA 6.1	Proceso de cálculo para dosificación del HCP.....	136
TABLA 6.2	Diseño Final de FT.....	137
TABLA 6.3	Relación entre el MR/TCD a los 28 días.....	146
TABLA 6.4	Relación entre el MR/TCD a los 28 días.....	147
TABLA 6.5	Presupuesto del diseño HCP+FT (23 cm. espesor).....	148
TABLA 6.6	Precios unitarios para diferentes tipos de pavimentos.....	148



CIB-ESPOL

ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CTH	Centro Técnico del Hormigón
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
FT	Fast Track
g	gramo
g / m ³	gramo – metro cúbico
° C	grados Centígrados
GPa	Giga Pascal
h	hora
HCP	Hormigón compactado con pavimentadora
HCR	Hormigón compactado con rodillo
HE	Cemento High Early
HR	Humedad relativa
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
in	pulgada
Kg	Kilogramo
Kg / m ³	Kilogramo – metro cúbico
Km	Kilómetro
kN	Kilo Newton
kN / seg	Kilo Newton - segundo
lb	libra
lt/m ³	litro – metro cúbico
m	metro
m ²	metro cuadrado
m ² /Kg	metro cuadrado - kilogramo
m ³	metro cúbico
mg	miligramo
mm	milímetro
mm ²	milímetro cuadrado
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de rotura
m/s	metro – segundo

NTE	Normas Técnicas Ecuatorianas
s	segundo
\$/Kg	Dólar – kilogramo
\$/lt	Dólar – litro
\$/m ²	Dólar – metro cuadrado
\$/m ³	Dólar – metro cúbico
TCD	Tracción por compresión diametral
us	micro segundos

SIMBOLOGÍA

HCP	Hormigón compactado con pavimentadora
HCR	Hormigón compactado con rodillo
FT	Fast Track
HCP+FT	Hormigón compactado con pavimentadora más Fast Track en conjunto
HCP-FT	Interfase entre el HCP y el FT
MR	Módulo de rotura
H	Hormigón
T	Tara
W	Agua
%W	Porcentaje de humedad
Δ (%)	Porcentaje de retracción
M	Molde
A	Área
V	Volumen
\$	Dólares americanos
X	Media
s \pm	Desviación Standard
a/c	Relación agua cemento
b	Base
h	Altura
L	Longitud
P	Fuerza
I	Inercia
f _c	Resistencia a la compresión
vc	Esfuerzo de corte
v	Esfuerzo de corte tangencial
α_x	Esfuerzos por gradiente térmico



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.



CIB-ESPOL

El presente trabajo trata de las "Propiedades Mecánicas de un diseño de Hormigón Compactado con Pavimentadora (HCP) y Fast Track (FT) trabajando en conjunto", tomando como base que el hormigón compactado debido a su mayor densificación y menor relación agua/cemento, ofrece mayores resistencias, constituyéndose en una alternativa económica para la construcción de pavimentos rígidos muy similares a aquellos construidos con un diseño de hormigón convencional; sin embargo, normas internacionales proponen que para vías de tráfico rápido y autopistas es necesario efectuar un texturizado superficial con el fin de mejorar la adherencia entre los neumáticos y el pavimento, dicho acabado no puede ser conseguido utilizando la tecnología del HCP.

Atendiendo este requerimiento y principalmente para no desaprovechar las bondades del HCP se han realizado pruebas con un hormigón

combinado utilizando como base el HCP y como capa de rodadura un hormigón de menor espesor, Fast Track, el cual es posible texturizar, además de que permite poner en servicio el pavimento en un corto plazo, sin que esto implique un mayor aumento en el costo del mismo.

Durante el desarrollo de esta tesis se estudiará el comportamiento mecánico de esta combinación, en que ambos elementos trabajan estructuralmente como uno solo, mediante una serie de pruebas que nos permitirán comprobar la confiabilidad y factibilidad de este sistema constructivo, el cual podría convertirse en una solución a los problemas viales de nuestro País.

1.1 Antecedentes.

El origen del Hormigón Compactado con Pavimentadora (HCP), se lo encuentra en el Hormigón Compactado con Rodillo (HCR), material cuya aplicación se inició a finales del siglo XIX, pero que sólo se usó en mayor escala, especialmente en la construcción de presas, a partir del tercer decenio del siglo pasado.

La fabricación de equipos adecuados permitió ampliar la utilización del HCR hacia vías de poco tráfico, patios de estacionamiento y posteriormente hacia vías de mayor importancia y Aeropuertos.

Las características y propiedades mecánicas de los hormigones empleadas en HCR y en HCP son iguales.

En cuanto al Fast Track las primeras experiencias en esta materia, comenzaron a fines de la década de los ochenta en Estados Unidos, específicamente en el Estado de IOWA, en donde se diseñó un hormigón capaz de ser puesto en servicio a las 24 horas. En idioma inglés, cualquier acción rápida se denomina Fast Track, por ello, ha sido común encontrar en bibliografía relativa a este hormigón de habilitación temprana el nombre de FAST TRACK CONCRETE.

La metodología del hormigón Fast Track surge ante la necesidad de acortar los tiempos de habilitación al tránsito de los pavimentos y agilizar las tareas de reparación de los ya existentes mediante el procedimiento de sobrecapeo o refuerzos sobre pavimentos de hormigón que se han deteriorado debido al uso o que por incremento en su volumen de tráfico necesitan un aumento en su espesor.

El refuerzo de hormigón utilizado es una capa de hormigón nuevo que se coloca sobre el pavimento que necesita ser reparado, cuya superficie debe ser tratada para retirar material descompuesto o defectuoso y obtener la rugosidad necesaria para lograr la perfecta adherencia entre el refuerzo y el pavimento.

Fundamentándose en este procedimiento aplicado desde hace algún tiempo con éxito en el mundo, el Centro Técnico del Hormigón ideó una variante de este procedimiento constructivo en el cual la capa Fast Track (simulando el papel de refuerzo) es colocado sobre el Hormigón Compactado con Pavimentadora (simulando el papel de pavimento viejo), tomando en cuenta que el tiempo de colocación entre ambas capas no debe ser mayor de 24 horas para certificar que la adherencia en la interfaz es la adecuada y actúen como una estructura monolítica.

Esta técnica ha permitido aprovechar las características mecánicas del HCP actuando en conjunto al FT con muy buenos resultados.

1.2 Objetivos.

Ya que la Investigación y experimentación es el único camino para desarrollar metodologías constructivas más eficientes, el presente trabajo tiene como objetivos:

- 1) Proporcionar un diseño de HCP y FT actuando en conjunto.
- 2) Verificar las Propiedades Mecánicas del Diseño proporcionado.
- 3) Dar a conocer y promover la factibilidad y confiabilidad de este sistema constructivo.

El cumplimiento de estos objetivos proporcionará una herramienta más para poder afrontar los problemas viales en nuestro País, al contar con esta innovadora técnica constructiva.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 2

2. EL HORMIGÓN COMPACTADO CON PAVIMENTADORA Y EL FAST TRACK TRABAJANDO EN CONJUNTO.

2.1 Proceso Constructivo.

2.1.1 Colocación de la capa de HCP.

2.1.1.1 Trabajos Previos.

Cuando la capa de HCP + FT es colocada sobre una subbase, ya sea esta pétreo, de agregados estabilizados con cemento, o de suelo cemento, dicha base debe ser previamente examinada para determinar si cumple con las condiciones de compactación y de tolerancias de su superficie. La capacidad portante de la subbase debe ser al menos igual a la considerada para el diseño del espesor de la carpeta.

Es importante recalcar que la subbase debe ser previamente hidratada para evitar que esta absorba el poco contenido de agua que contiene el HCP.

2.1.1.2 Provisión del Hormigón.

El transporte del Hormigón desde la planta hasta la obra se lo hace mediante camiones volquetes ya que no es recomendable utilizar camiones mezcladores debido al bajo contenido de humedad de este hormigón.

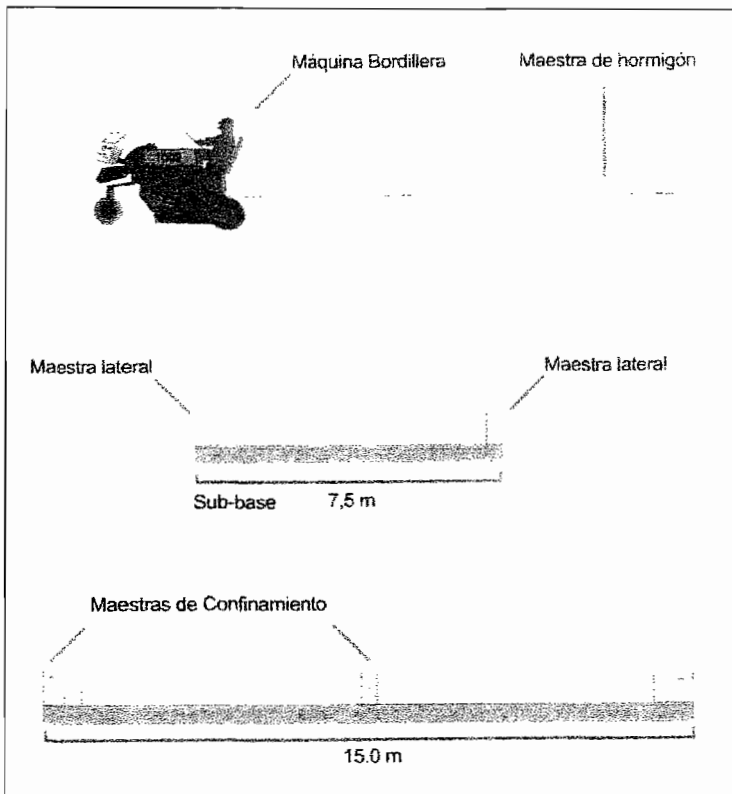
Durante el trayecto desde la planta hasta su descarga en la tolva de la pavimentadora el hormigón es cubierto con lonas en el balde de los camiones que lo transportan, de ser necesario es posible utilizar productos retardadores de evaporación, pulverizados en la parte superior del hormigón.

Es muy importante una buena planificación de los trabajos a realizarse para que el hormigón sea proporcionado de manera regular evitando que se produzcan retrasos en la obra.

2.1.1.3 Construcción de Maestras de Hormigón.

La construcción de maestras previo a la colocación del HCP se ha desarrollado como un procedimiento rápido y seguro que garantiza por una parte confiabilidad en las cotas finales del proyecto usándolas como guías para los sensores automáticos de la pavimentadora. Por otra parte proporciona un confinamiento lateral a las fajas de tránsito de HCP a fin de obtener la máxima regularidad y efectividad en la compactación de dichas fajas.

Cuando el ancho de las fajas a construir es mayor al ancho que puede construir una máquina (generalmente 7,50 m.), se coloca una maestra central y se ejecuta la obra en dos fajas con lo que cada una de ellas estará confinada con sus respectivas maestras laterales.



CIB-ESPOL

FIGURA 2.1 Ubicación de las maestras de confinamiento

La construcción de maestras de hormigón se puede realizar con una máquina bordillera o una pavimentadora de encofrados deslizantes, estas maestras o guías deben tener un acabado muy preciso ya que se deben utilizar para controlar los niveles del pavimento.

2.1.1.4 Tendido de la Capa de HCP.

Cuando se vaya a colocar sobre la capa de HCP una capa final de Fast Track el HCP quedará confinado y compactado dentro de las guías de hormigón algunos centímetros por debajo del espesor total de la vía, este espacio será completado con la capa final de rodadura FT.

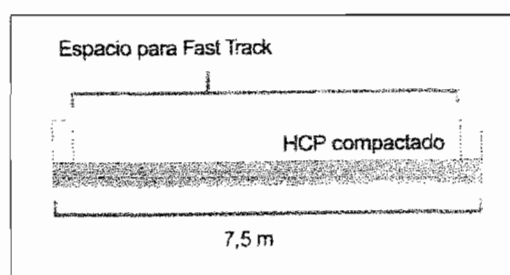


FIGURA 2.2 Colocación de la capa de HCP

2.1.1.5 Determinación del porcentaje de compactación.

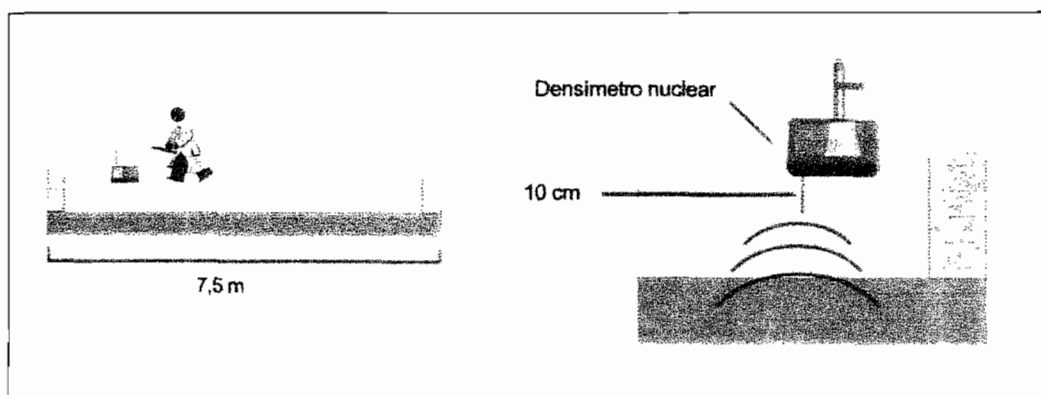


FIGURA 2.3 Control de la densidad de la capa de HCP

El porcentaje de compactación será comprobado mediante un densímetro nuclear cuya fuente de lectura se marca a una profundidad de 10cm. por

debajo de la superficie a fin de comprobar que el porcentaje de compactación se mantenga en todo el volumen del hormigón correspondiente a la carga de rodadura.

2.1.1.6 Rodillado para compactación final.

Como la Pavimentadora normalmente produce una compactación de entre 90 y 95%, se requiere de una compactación adicional para completarse el mínimo de 98% requerido, utilizando rodillos planos con capacidad de vibración.

La compactación con rodillo debe realizarse tan pronto este tenga el espacio para realizar su labor, normalmente entre 10 y 15 m. detrás de la pavimentadora.

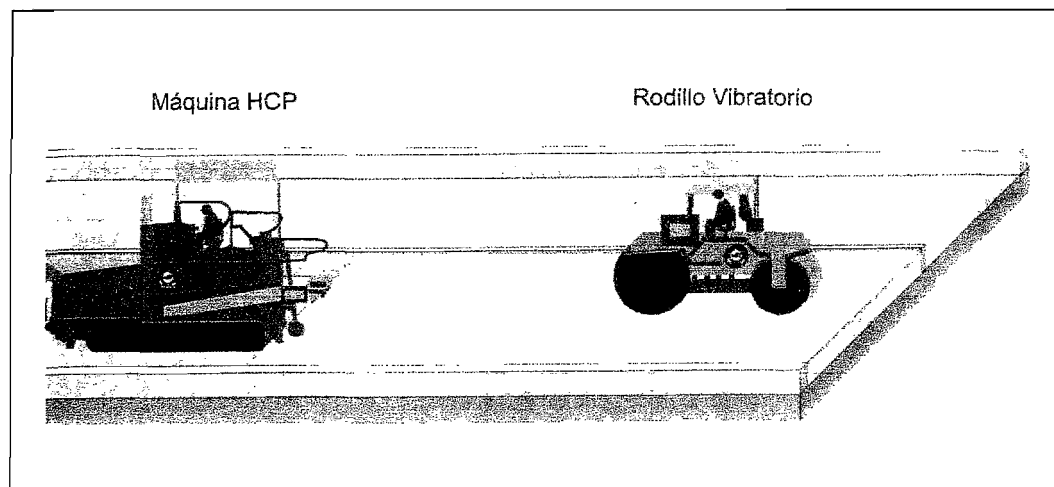


FIGURA 2.4 Compactación con rodillo vibratorio

2.1.1.7 Corte de Juntas para HCP.

Una vez que se ha conseguido la compactación requerida se ejecutarán los cortes de las juntas transversales mediante máquinas que poseen sierras circulares con filos diamantados. Los cortes deben hacerse a una distancia igual a tres veces la distancia entre las juntas previstas para la carpeta de Fast Track y con una profundidad de $\frac{1}{4}$ del espesor de la capa de HCP.

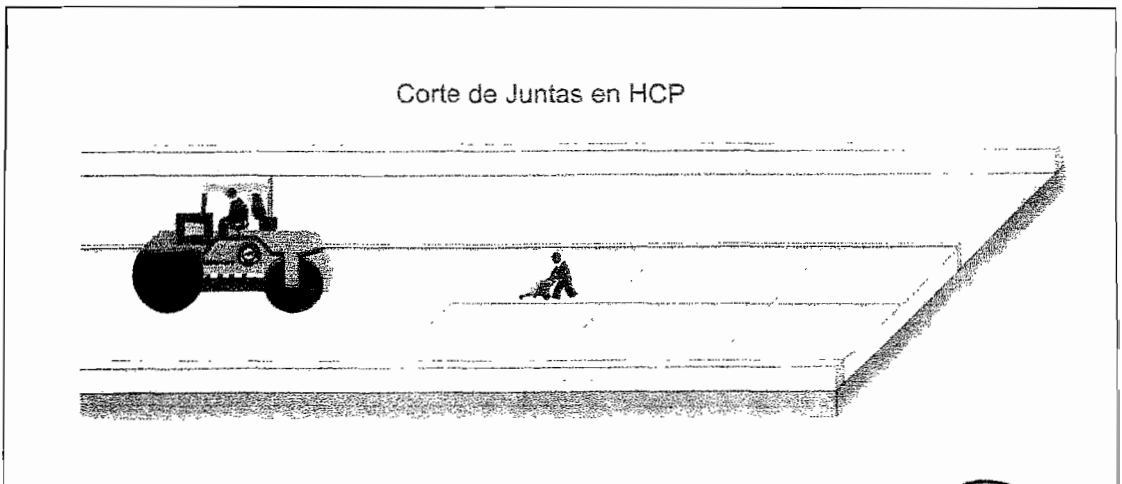


FIGURA 2.5 Aserrado de juntas en la capa de HCP



CIB-ESPOL

2.1.2 Colocación de la Capa de Fast Track.

2.1.2.1 Provisión del Fast Track.

Una de los principales factores para conseguir un buen resultado en la colocación del FT es que la planta productora de hormigón pueda proporcionar en forma regular el volumen provisto, debe existir una

perfecta coordinación en el despacho de hormigón más aún si se dispone de una sola planta hormigonera para la producción del HCP y del FT.

Es muy importante que la capa de Fast Track tenga que ser colocada con un mínimo de desfase en tiempo con respecto a la capa de HCP, y en caso de ocurrir este no debe ser mayor a 24 horas. Esta condición es indispensable para garantizar la adherencia entre las dos capas.

2.1.2.2 Tendido de la Capa de Fast Track.

La colocación del Fast Track debe hacerse con una Pavimentadora provista con vibradores de aguja, cuya alimentación debe hacerse lateralmente mediante camiones mezcladores, de esta manera al no circular sobre la capa de HCP se evita que esta sea contaminada con impurezas como fugas de aceite o materiales acarreados por los neumáticos.

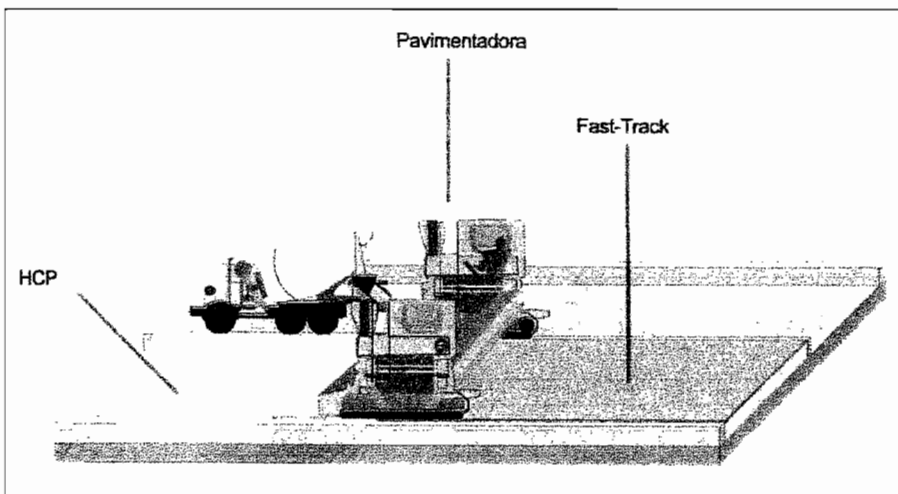


FIGURA 2.6 Colocación de la capa de Fast Track

Se debe tener especial precaución en mantener la superficie del HCP libre de polvo, impurezas y humedad al momento de colocar la capa de FT para asegurar una completa adherencia entre las capas.

La colocación del FT debe realizarse tan pronto como se hayan aserrado las juntas del HCP, tanto la provisión como la colocación del FT debe regularse de tal forma que la distancia entre la Pavimentadora de FT y la del HCP permanezca adecuadamente constante.

El desarrollo de los trabajos debe programarse de tal manera que la capa de HCP quede totalmente cubierta por la capa de FT al finalizar el día de trabajo, en el caso de existir interrupción de los trabajos en la colocación del FT debido a problemas con los equipos, fallas en la provisión del hormigón o condiciones atmosféricas adversas, será necesario proteger con láminas de polietileno o lona aquellas zonas de HCP que queden expuestas, en caso de no ser protegidas se deberá limpiar dichas zonas cuidadosamente con chorro de aire antes de la colocación de la capa de Fast Track.

2.1.2.3 Acabado y curado de Fast Track.

La capa final de rodadura recibirá un texturizado e inmediatamente un curado químico con el fin de controlar las pérdidas de humedad y permitir que se produzcan las reacciones de hidratación.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

El compuesto curador debe ser aplicado con un volumen de 350 a 400 g/m³. El compuesto curador debe ser cuidadosamente aplicado a fin de que ningún sector quede sin ser cubierto, se debe tener la precaución de no aplicar el compuesto curador sobre el HCP si existiera alguna zona de esta capa sin cubrir con FT, ya que la capa de curador impedirá la adherencia .

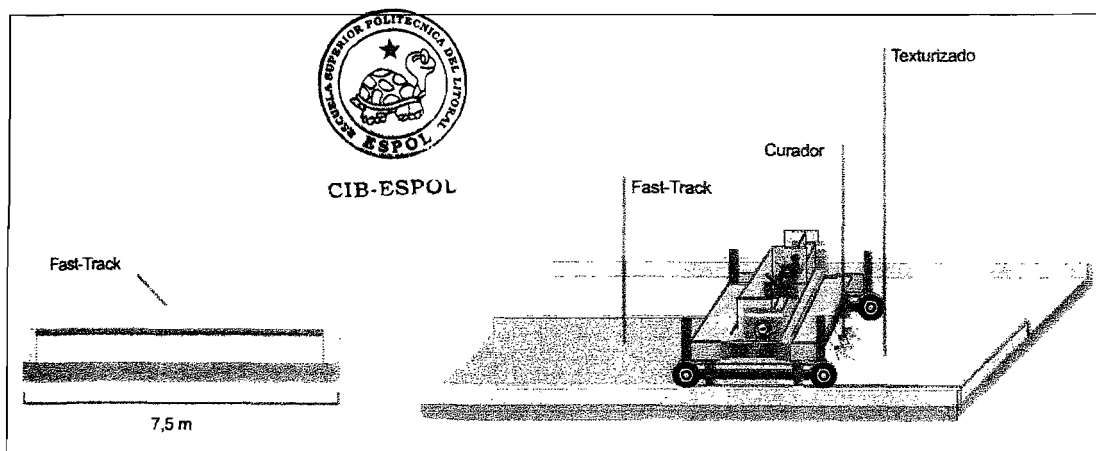


FIGURA 2.7 Texturizado y curado la capa de Fast Track

2.1.2.4 Corte y Relleno de las Juntas del FT.

El corte de las juntas debe realizarse tan pronto como la consistencia del homigón lo permita, sin que se produzcan despostillamientos.

La profundidad del corte de las juntas será no menor a un tercio del espesor total del HCP+FT. Se deben usar discos diamantados de 3 a 4 mm. de espesor.

Para anchos de pavimentos mayores de 4 m. debe hacerse un corte longitudinal en el centro de la carpeta.

Después de hacer el corte de las juntas a la profundidad requerida, es necesario pasar nuevamente una sierra de 6 mm. de espesor en una profundidad de 2 cm. de esta manera se formará la caja para el sellado de la junta.

Una vez efectuada la limpieza de las juntas con aire a presión, estas deben ser rellenadas con AP3, cintas de caucho o silicón, estos materiales evitarán el ingreso de agua y la rotura de filos.

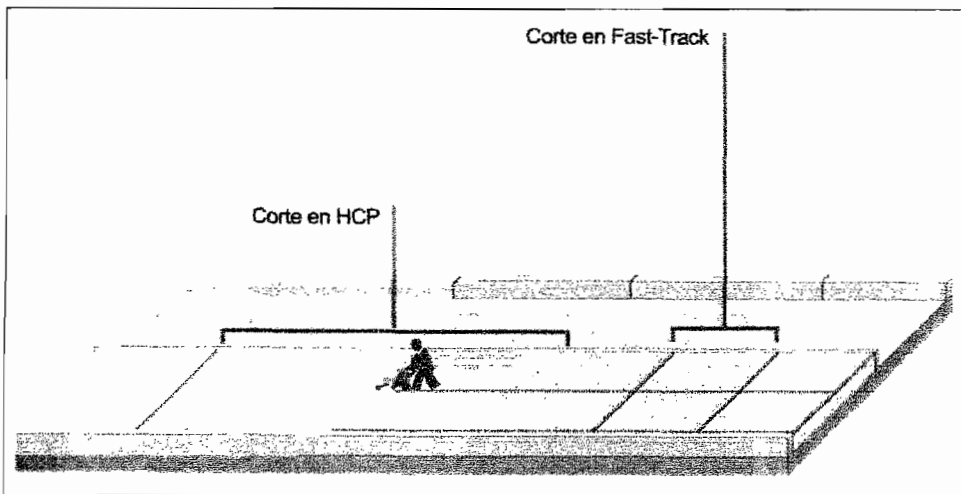


FIGURA 2.8 Corte de Juntas en la capa de Fast Track

Una vez terminados estos procedimientos y con las precauciones del caso el pavimento esta listo para la apertura al tráfico.

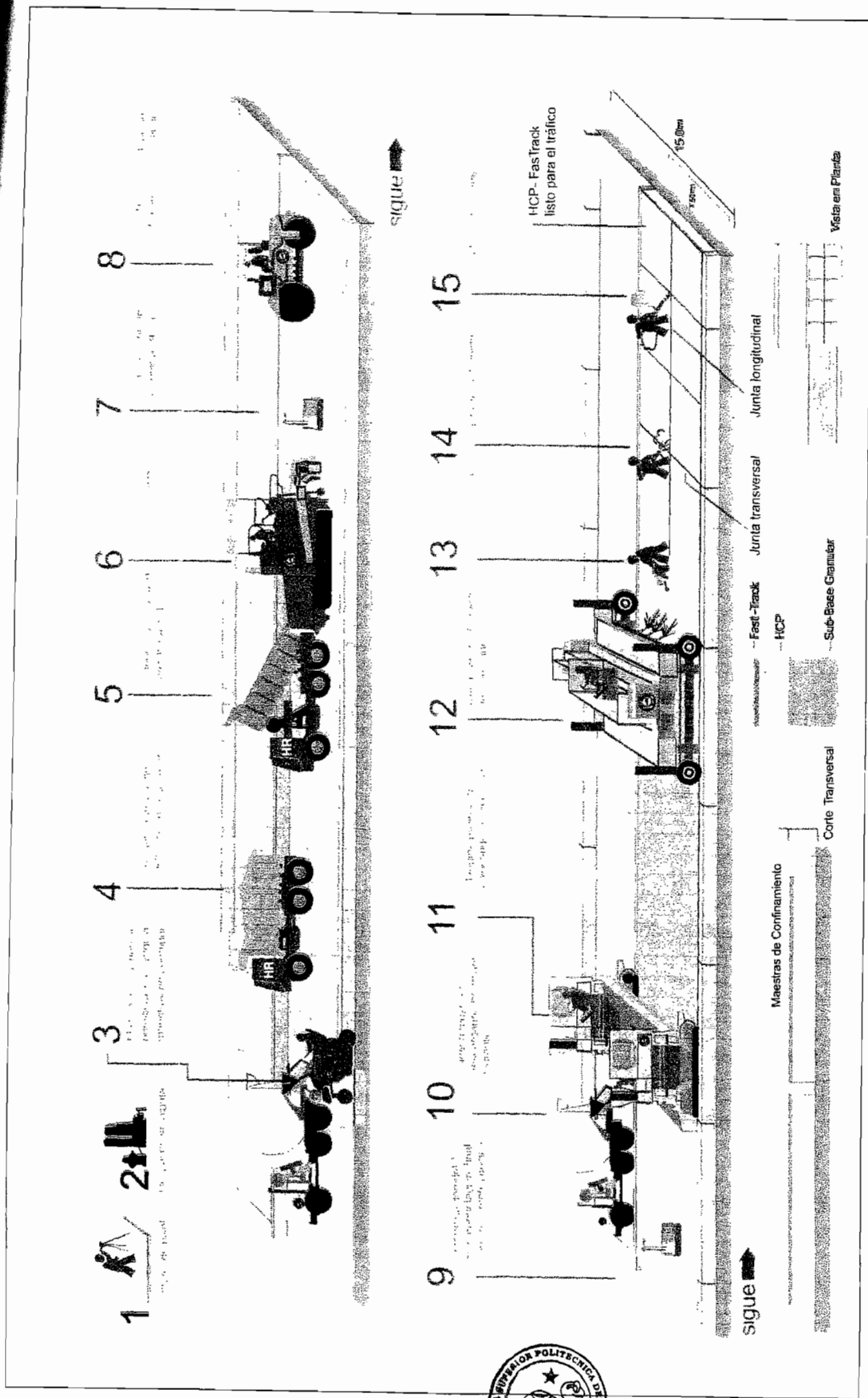


FIGURA 2.9 Esquema gráfico del procedimiento constructivo HCP+FT



2.2 Ventajas.

Una de las ventajas de este procedimiento constructivo, es la posibilidad de a apertura al tráfico dentro de plazos muy cortos.

Los pavimentos ejecutados con este sistema tienen las mismas características de acabado y de duración que un pavimento rígido convencional, pero pueden abrirse al tráfico en muy poco tiempo.

Su vida útil es mucho mayor que el de los pavimentos flexibles, sobrepasa los 40 años con resistencia a la flexión de más de 4 – 4.5 MPa. Y su costo de mantenimiento como en los pavimentos de hormigón convencional son notablemente mas bajos que los de carpeta asfáltica.

Un estudio de costos comparativo entre HCP y HCP + FAST TRACK realizado por el Centro Técnico del Hormigón indica lo siguiente:

Sin incrementar los costos, se pueden construir pavimentos con la combinación de HCP + FT, que tengan las mismas características de rodadura de los pavimentos de hormigón convencional, con la ventaja de que pueden ser puestos en servicio dentro de las 48 horas posteriores a su construcción.

2.3 Usos.

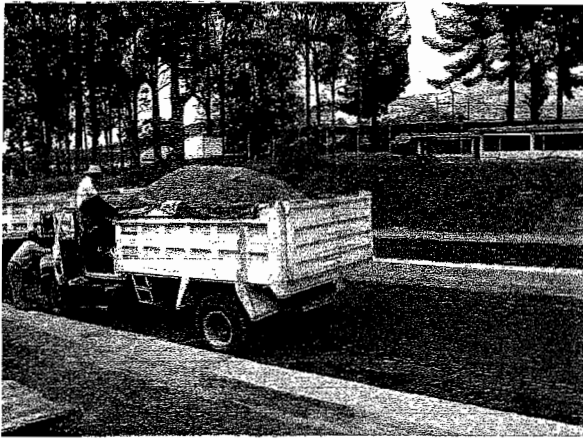
Gracias a las bondades de esta combinación HCP + FT es posible construir, calles, carreteras, autopistas, pistas de aeropuertos, pavimentos industriales, estacionamientos, etc.



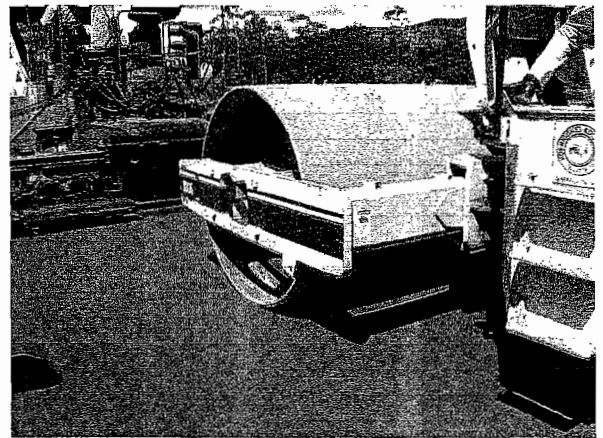
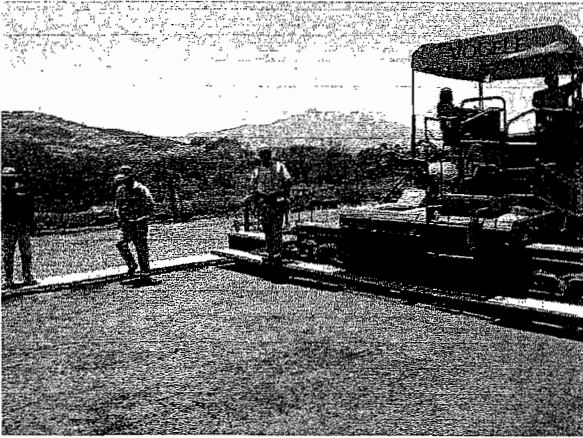
Existen trabajos ejecutados con la tecnología del HCP, como el patio para equipos pesados de MAMUT ANDINO C.A., las vías de Ingreso y de circulación a la Fábrica de Cementos en Cerro Blanco y su zona de estacionamiento de camiones de gran peso para transporte de cemento en fundas, Avenida de entrada a Trinipuerto entre otras, mientras que para el sistema constructivo HCP + FT se realizaron inicialmente tramos experimentales como el que se encuentra en el patio de ensayos de lo que era Hormigones Rocafuerte, en su planta San Eduardo así como en la planta de cemento en Cerro Blanco, hoy propiedad de Hormigones Holcim.

Posteriormente se realizó con carácter oficial la reconstrucción de un tramo de la autopista Quito - Aloag, ese tramo de vía tiene alrededor de 3 Km. de largo y 18 m. de ancho, la empresa ganadora de la licitación propuso la utilización del sistema HCP + FT, el Ministerio de Obras Públicas aceptó la propuesta y el tramo licitado se construyó usando este procedimiento, con resultados altamente satisfactorios.

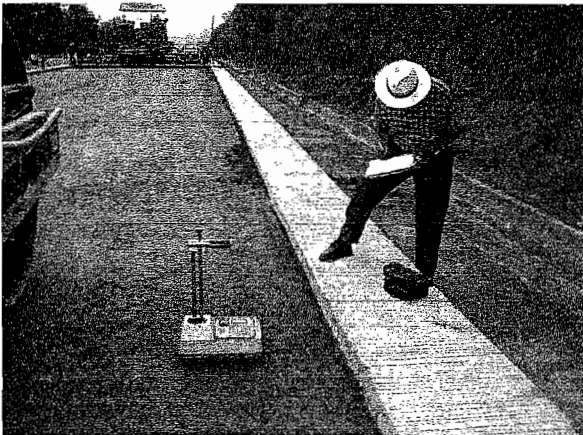
El proceso constructivo de la vía en mención la cual se encuentra prestando servicio en la actualidad, será presentado a continuación en una secuencia gráfica, cabe mencionar que tanto los estudios realizados como la experiencia adquirida en la construcción de esta vía sirvieron de base para el desarrollo de esta tesis.



(a) Transporte del HCP y alimentación de la pavimentadora



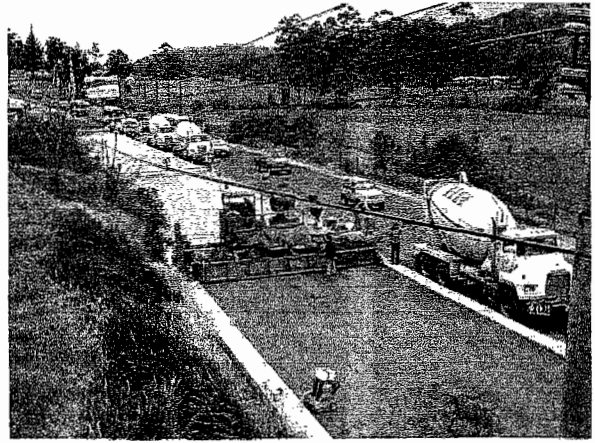
(b) Tendido del HCP y compactación con rodillo vibratorio



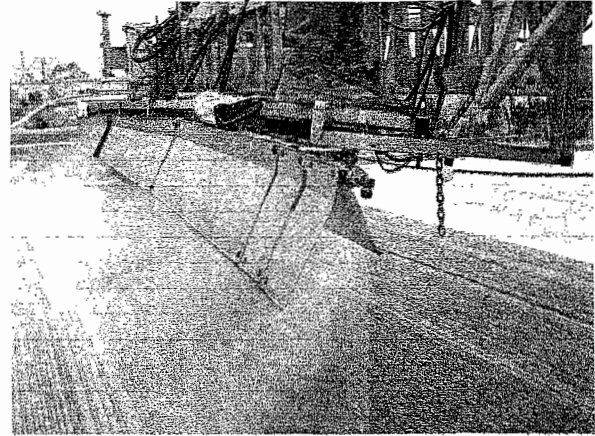
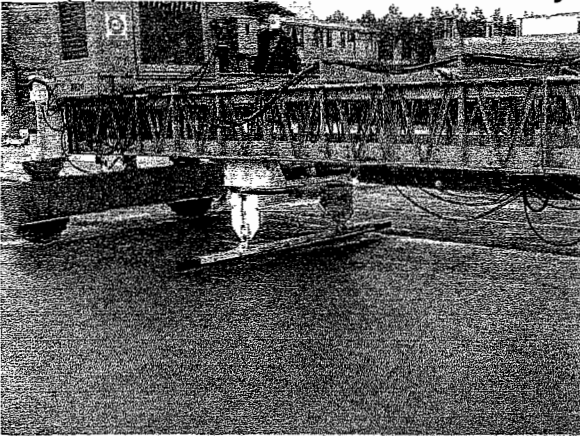
(c) Comprobación de la compactación y corte de juntas

FIGURA 2.10 Colocación de la capa de HCP

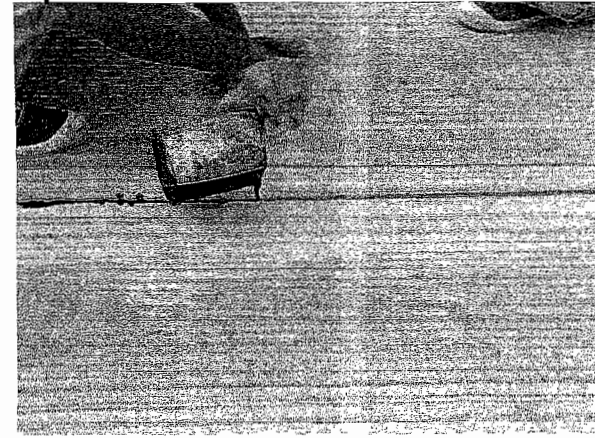
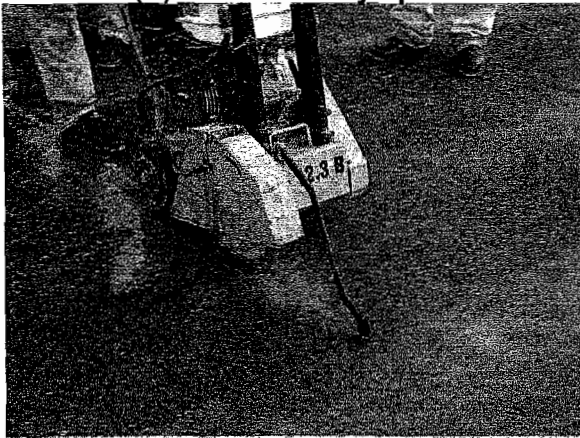




(a) Provisión por medio de mixers y tendido de FT con pavimentadora



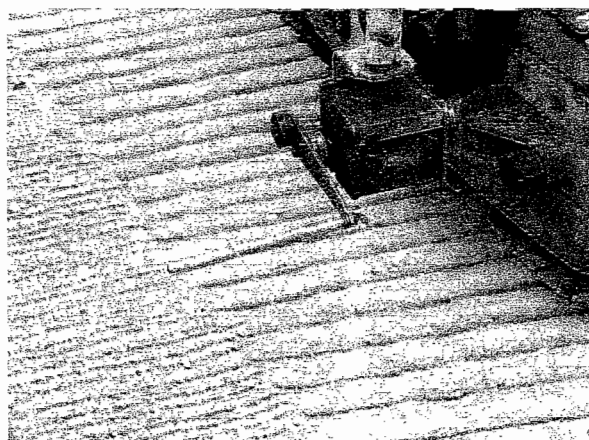
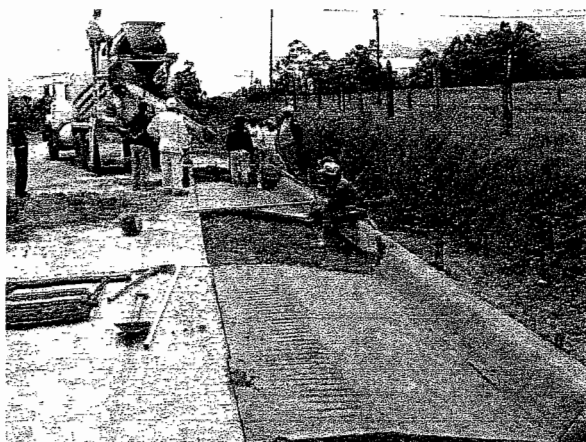
(b) Texturizado y aplicación de compuesto curador sobre FT



(c) Corte y sellado de juntas en la capa de FT

FIGURA 2.11 Colocación de la capa de FT





(a) Terminación de cunetas y rayado profundo para advertencia al conductor



(b) Carpeta de HCP+FT finalizada y trabajos de señalización de la vía



(c) Vía Terminada y abierta al tráfico

FIGURA 2.12 Trabajos complementarios y puesta en servicio
(Fotografías cortesía del Centro Técnico del Hormigón)

CAPÍTULO 3

3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON PAVIMENTADORA Y DEL FAST TRACK.

3.1 Características Mecánicas del HCP.

Si bien el ACI y el ASTM no señalan procedimientos estandarizados para la elaboración y evaluación de los especímenes de este tipo de hormigón (HCP), las experiencias realizadas en laboratorios permiten asegurar que los procedimientos evaluación de las propiedades mecánicas de un hormigón convencional son aplicables para evaluar el HCP, lo que ha permitido comprobar que la baja relación agua cemento más un alto grado de compactación produce una máxima resistencia, lo que equivale a un mínimo consumo de cemento y a máxima economía.

3.1.1 Resistencia a la Compresión del HCP.

El diseño de HCP propuesto en esta investigación, con un contenido de cemento de 250 Kg/m^3 , alcanza resistencias a la compresión de 23,3

MPa. a los 28 días gracias a su baja relación agua cemento y su elevada compactación, alcanzando el 69% de su resistencia a tan sólo 3 días de haber sido colocado.

3.1.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del HCP.

La resistencia a T.C.D. en el diseño propuesto tiene un valor de 3,1 MPa. a 28 días obteniendo el 70% de su resistencia a los 7 días de haber sido colocado.



CIB-ESPOL

3.1.3 Resistencia a la flexión del HCP.

En un hormigón convencional, las partículas de los agregados permanecen dispersas en la pasta de cemento y de este modo no se produce cabal contacto permanente entre ellas, mientras que en HCP ocurre todo lo contrario, en donde si se produce contacto entre las partículas de los agregados, lo que quiere decir que la resistencia mecánica de éstos adquiere mayor influencia en la resistencia a flexión del HCP.

La resistencia a la flexión del diseño de HCP presentado tiene un módulo de rotura de 4,53 MPa. a los 28 días, se puede afirmar que es un comportamiento más eficiente al de un hormigón convencional.



CIB-ESPOL

3.1.4 Módulo de elasticidad del HCP.

El módulo de elasticidad es otra característica del HCP que se pudo obtener con facilidad utilizando el mismo mecanismo empleado con un hormigón convencional, se estableció que el modulo de elasticidad fue de 21,65 GPa.

3.1.5 Retracción por secado del HCP.

Se determinó de manera experimental que la retracción del diseño de HCP es de 440×10^{-6} , en donde el HCP fue expuesto a secado en un ambiente no saturado.

3.1.6 Otras propiedades.

Otras propiedades como el comportamiento a la fatiga es similar al de los hormigones convencionales, mientras que la durabilidad a través de proyectos ejecutados en climas donde se presentas severos casos de congelamiento y deshielo, el comportamiento del HCP no ha demostrado fallas en este campo.

3.2 Características Mecánicas del Fast Track.

3.2.1 Resistencia a la Compresión del Fast Track.

El diseño de FT presentado en esta investigación, con un contenido de cemento de 450 Kg/m^3 , alcanza resistencias a la compresión de 68,3 MPa. a los 28 días gracias a su baja relación agua cemento alcanzado mediante el uso de una aditivo reductor de agua de alto rango y a la

adición de zeolita molida, alcanzando el 87% de su resistencia a tan sólo 3 días de haber sido colocado.

3.2.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del Fast Track.

La resistencia a T.C.D. en el diseño propuesto tiene un valor de 6,6 MPa. a 28 días obteniendo el 77% de su resistencia a los 3 días de haber sido colocado.

3.2.3 Resistencia a la flexión del Fast Track.

La resistencia a la flexión del diseño de FT presentado tiene un módulo de rotura de 8,3 MPa. a los 28 días, al obtener valores elevados en los módulos de rotura en la resistencia a T.C.D como en la flexión el factor de relación entre estos va a ser de 1,25 .

3.2.4 Modulo de elasticidad del Fast Track.

El módulo de elasticidad que posee el diseño de Fast Track es de 26,05 GPa.

3.2.5 Retracción por secado del Fast Track.

Se determinó de manera experimental que la retracción del diseño de FT es de 485×10^{-6} , en donde el FT fue expuesto a secado en un ambiente no saturado.

3.3 Características Mecánicas del HCP+FT.

Como normalmente los pavimentos rígidos se diseñan en función de la resistencia a la tracción del hormigón (MR), la caracterización del HCP+FT se realizó tratando de establecer su verdadera capacidad para soportar esfuerzos de tracción y no esfuerzos de compresión.

3.3.1 Resistencia a la flexión del HCP+FT.

La resistencia a la flexión del diseño de HCP+FT presentado tiene un módulo de rotura de 5,3 MPa. a los 28 días, con un comportamiento monolítico del HCP y del FT, superando el módulo de rotura de 4 MPa. que regularmente se acostumbra como resistencia especificada en nuestro país.

3.3.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral del HCP+FT.

El valor de la resistencia a la tracción del HCP+FT es 3,8 a los 28 días, valor obtenido de núcleos calados en vigas de HCP+FT.

3.3.3 Otras características del HCP+FT.

El comportamiento que se tiene a nivel de la interfase entre HCP-FT es ampliamente analizado en la sección 6.3.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 4

4. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

El contenido de este capítulo involucra todos los procedimientos experimentales que se utilizaron tanto para obtener los diseños patrones del Hormigón Compactado y del Fast Track, así como la metodología empleada en la elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas para la caracterización de los hormigones anteriormente mencionados de manera individual y actuando en conjunto con sus respectivos ensayos, los cuales además de caracterizar el diseño tienen como principal objetivo verificar la adherencia en la interfase HCP – FT.

Para la elaboración de muestras y ensayos se adoptó el uso de normas internacionales como las propuestas por el ASTM (*American Society for Testing and Materials*), y en algunas ocasiones se hicieron adaptaciones de dichas normas para aplicarlas al sistema constructivo del HCP y FT trabajando en conjunto.

4.1 Materiales utilizados.

4.1.1 Materiales empleados en el HCP.

4.1.1.1 Cemento.

El material cementicio utilizado para la elaboración del HCP es el **Cemento Pórtland Tipo 1P HE** (*High Early*), que es un cemento compuesto, del grupo Pórtland Puzolánico, que cumple con la especificación ASTM C 1157-03 (Certificación de cemento hidráulico por desempeño), cuya característica principal es la de desarrollar resistencias a la compresión elevadas, a edades tempranas.

Desde el punto de vista de especificaciones de la norma, este tipo de cemento sirve para uso estructural general en la construcción. En el caso particular de Cementos del Tipo 1P HE, debido a sus resistencias mucho más altas que las exigidas en la norma, sirve también para la producción de hormigones de alta resistencia inicial. Por lo tanto, el Cemento Tipo 1P HE se lo puede utilizar ya sea cuando se requieren resistencias superiores, o cuando se desea ahorrar en el contenido de cemento del hormigón, como es el caso del sistema constructivo propuesto.

Su contenido de adición puzolánica le añade otras ventajas como son mejores resistencias al ataque de sulfatos, mayor resistencia a la reacción álcali-agregados, es decir, mejor resistencia a ataques químicos que significa mayor durabilidad en general. Adicionalmente este cemento

tiene una mejor trabajabilidad y una mayor cohesividad debido a la adición puzolánica, y a su gran superficie específica.

TABLA 4.1 Características Físicas del cemento Pórtland 1P(HE)

Propiedad	Unidad	NTE INEN 2380 ASTM C-1157	NTE INEN 490 ASTM C-595	Resultado
Contenido de aire en mortero	%	---	12 máx.	2.9
Blaine	m ² /Kg	---	---	460
Rentenido en 45 µm. (No.325)	%	---	---	5.8
Contracción en Autoclave	%	---	0.20 máx.	0.04
Fraguado inicial Vicat	minutos	45-420	45-420	163
Fraguado final Vicat	minutos	---	---	283
Resistencia a compresión				
1 Día	MPa.	10.0 mín.	---	13.4
3 Días	MPa.	17.0 mín	13.0 mín.	25.5
7 Días	MPa.	---	20.0 mín.	32.8
20 Días	MPa.	---	25.0 mín.	38.6
f'c (7 días)	MPa.	---	---	31.6

* Fuente de Información: HCLCIM



4.1.1.2 Agregados.

Los agregados utilizados se clasificarán en agregados finos, menores que 4,76 mm. (No. 4), y agregados gruesos mayores que 4,76 mm.

El agregado fino sólo estará constituido por una arena manufacturada por trituración con la finalidad de obtener un hormigón con una textura superficial abierta para mejorar la adherencia en la interfase HCP – FT.

El agregado grueso empleado está conformado por una combinación de calizas trituradas con un tamaño nominal máximo de agregado de 12 y 19 mm. respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 4.1.

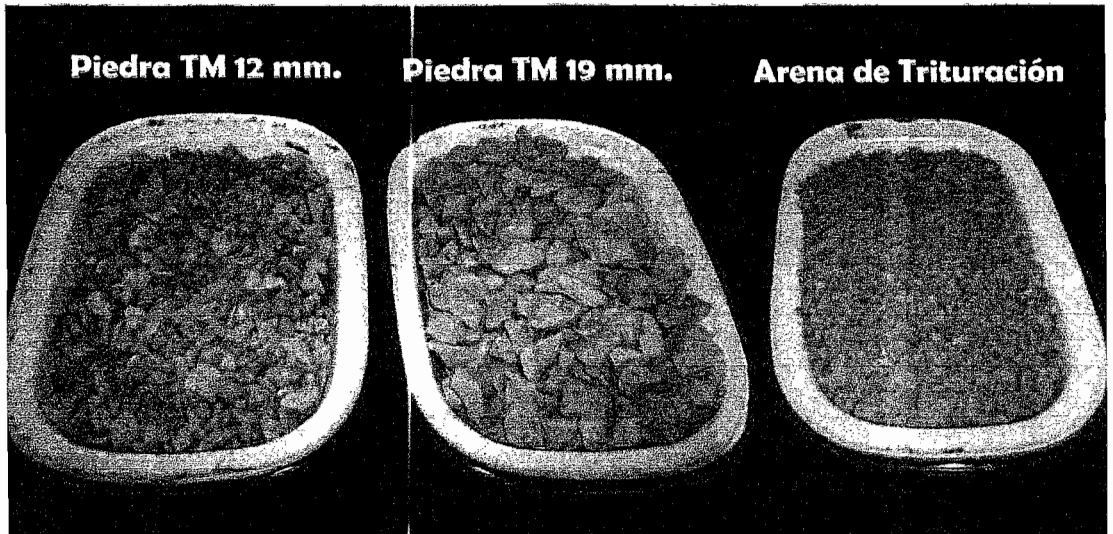


FIGURA 4.1 Muestra de los agregados Finos y Gruesos

4.1.1.3 Aditivos.

Con el objeto de mejorar la trabajabilidad del hormigón se utilizó el Aditivo **POLYHEED RI**, el cual es un aditivo retardante, reductor de agua de rango medio, multicomponente y libre de cloruros, cumple con la norma **ASTM C – 494** para aditivos tipo B y D.

Además de mejorar la trabajabilidad incrementa la resistencia del hormigón a los ciclos de congelamiento y deshielo, reduce la segregación, y extiende el tiempo de fraguado en climas cálidos, es decir prolonga el

tiempo durante el cual el hormigón se puede transportar, colocar, y compactar.



FIGURA 4.2 Aditivo POLYHEED RI

4.1.1.4 Agua.

El agua que se emplea en la mezcla debe ser limpia, libre de impurezas y carecerá de aceites, álcalis, ácidos, sales, azúcar y materia orgánica. Se puede utilizar agua potable.

4.1.2 Materiales empleados en el Fast Track.

4.1.2.1 Cemento.

El ligante utilizado en el Fast Track es el **Cemento Tipo I**, pertenece al grupo Pórtland, el cual es admirablemente adecuado para la construcción en general con hormigón cuando no hay exposición a sulfatos en suelos ó aguas freáticas.

Este cemento cumple con las siguientes normas:



TABLA 4.2 Características Físicas del cemento Pórtland tipo I

Propiedad	Unidad	NTE INEN 2380 ASTM C-1157	NTE INEN 490 ASTM C-595	Resultado
Contenido de aire en mortero	%	12 máx.	12 máx.	3.7
Blaine	m ² /Kg	280 mín.	280 mín.	290
Retenido en 45 µm. (No.325)	%	---	---	13.4
Contracción en Autoclave	%	0.80 máx.	0.80 máx.	0.08
Fraguado inicial Vicat	minutos	45-375	45-375	164
Fraguado final Vicat	minutos	---	---	281
Resistencia a compresión				
1 Día	MPa.	---	---	12.2
3 Días	MPa.	12.0 mín	12.0 mín.	21.3
7 Días	MPa.	19.0 mín.	19.0 mín.	30.1
20 Días	MPa.	---	28.0 mín.	41.9
f'c (7 días)	MPa.	---	---	24.8

* Fuente de Información: HO L CIM



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

4.1.2.2 Adiciones.

En el diseño del Fast Track se empleó Zeolita la cual es una puzolana conformada por materiales silíceos o sílico – aluminosos, la cual no posee propiedades cementantes por sí misma, finamente molida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio del cemento a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

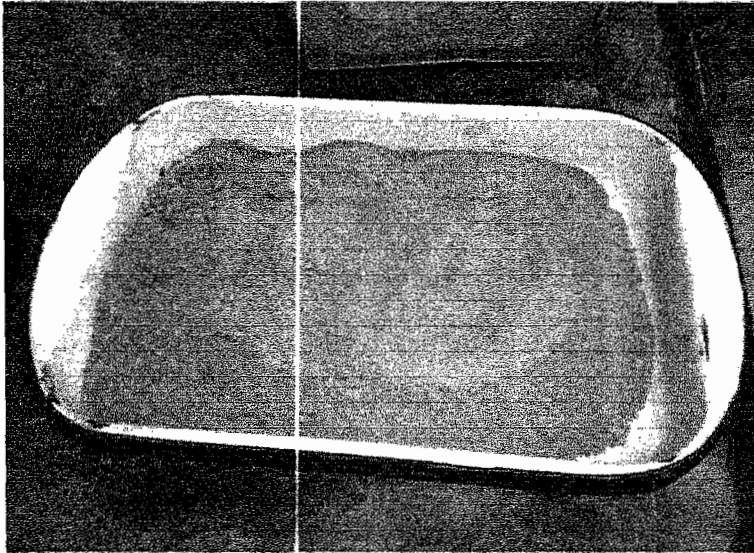


FIGURA 4.3 Zeolita molida.

4.1.2.3 Agregados.

Los agregados utilizados se clasificarán en agregados finos, menores que 4,76 mm. (No. 4), y agregados gruesos mayores que 4,76 mm.

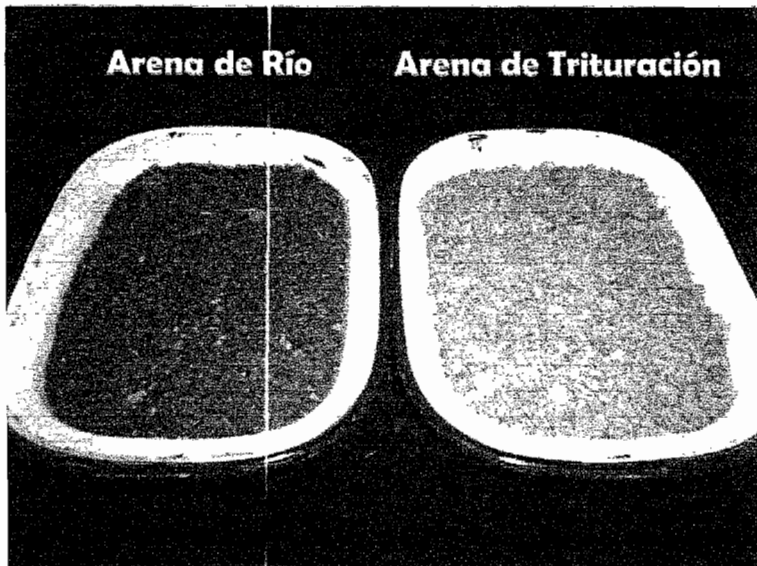


FIGURA 4.4 Muestra de Agregados Finos

El agregado podrá estar constituido por una combinación de arena manufacturada por trituración con arena natural, como se muestra en la figura 4.4, con la finalidad de obtener un hormigón con una superficie texturizable y con buen acabado.

El agregado grueso empleado está conformado por una combinación de calizas trituradas con un tamaño nominal máximo de agregado de 12 y 19 mm. respectivamente.



CIB-ESPOL

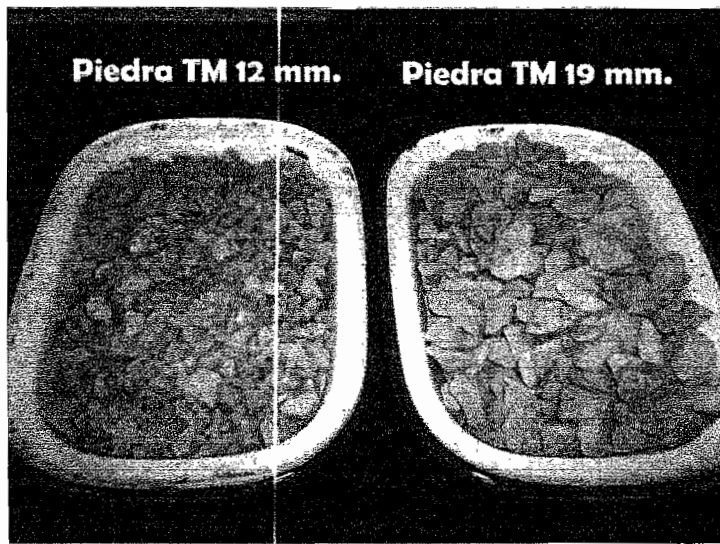


FIGURA 4.5 Muestra de Agregados Gruesos



CIB-ESPOL

4.1.2.4 Aditivos.

En el caso del Fast Track se empleó un aditivo Superfluidificante, que en nuestro medio tiene por nombre comercial **HIPERMIX** como se muestra en la figura 4.6, el cual además es un reductor de agua de alto rango.



CIB-ESPOL

FIGURA 4.6 Aditivo HIPERMIX

4.2 Metodología Empleada.

4.2.1 Pruebas de Granulometría (ASTM C136-01)

4.2.1.1 Objetivo.

Este método de ensayo tiene por objeto determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada.

Adicionalmente mediante este ensayo se determina el módulo de finura y la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

4.2.1.2 Equipos utilizados.

- Balanza, con sensibilidad de por lo menos 0.1 % del peso de la muestra que va a ser ensayada.
- Tamices seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado
- Tamizadora mecánica, como se muestra en la Figura 4.7.

En terminología de la ASTM, los superfluidificantes son conocidos como aditivos de Tipo F, cumplen con la norma ASTM C 494 – 92.

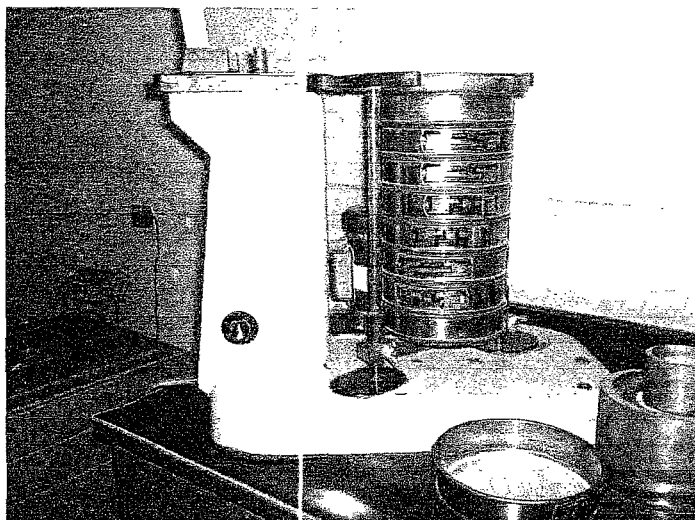
La forma en que actúan estos aditivos es haciendo que las grandes moléculas orgánicas se absorban ellas mismas alrededor de las partículas de cemento proporcionando a su superficie una carga altamente negativa de modo que se repelen unas de otras. Esto da por resultado la defloculación y la dispersión de las partículas de cemento. El mejoramiento resultante de trabajabilidad se puede explotar de dos formas, la primera, mediante la producción de un hormigón con una trabajabilidad muy alta, ya que el hormigón resultante se puede colocar con poca o sin ninguna compactación y no está sujeto a exceso de sangrado o de segregación y, la segunda, con un hormigón de una resistencia muy alta, debido a una reducción muy considerable de la relación agua / cemento.

4.1.2.5 Agua.

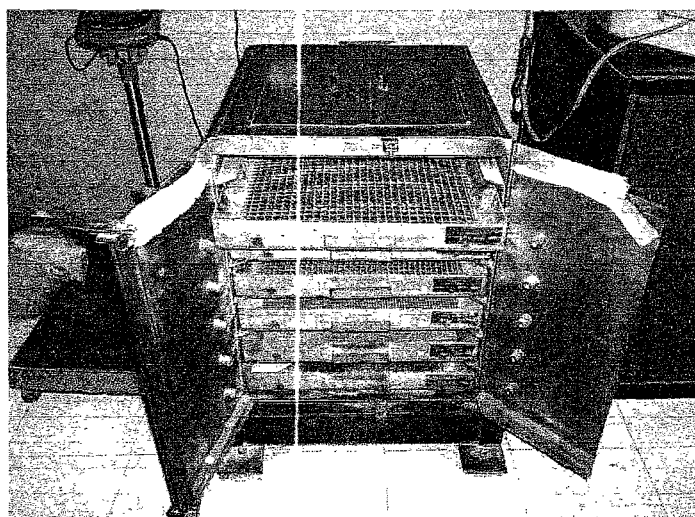
El agua de manera similar al caso anterior debe ser limpia, libre de impurezas y carecerá de aceites, álcalis, ácidos, sales, azúcar y materia orgánica. Se puede utilizar agua potable.



CIB-ESPOL



(a) Tamizadora para Agregados Finos



(b) Tamizadora para Agregados Gruesos

FIGURA 4.7 Tamizadoras Mecánicas para Agregados

4.2.1.3 Procedimiento.

- Las muestras de agregado fino para el análisis granulométrico, deben ser representativas y tener aproximadamente un peso de 600 a 700 g.

para no obstruir la abertura de los tamices, mientras que la muestra para el agregado grueso debe tener un peso aproximado de 7 a 8 kg.

- Seleccionar un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar colocados en orden decreciente, por tamaño de abertura.
- Colocada la muestra sobre el tamiz de mayor abertura, efectuar la operación de tamizado por medio del tamizador mecánico, durante un período determinado.
- Determinar el peso de la muestra retenido en cada tamiz con la balanza de precisión.

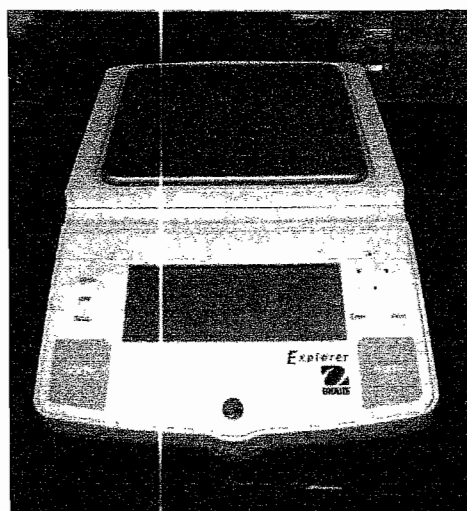
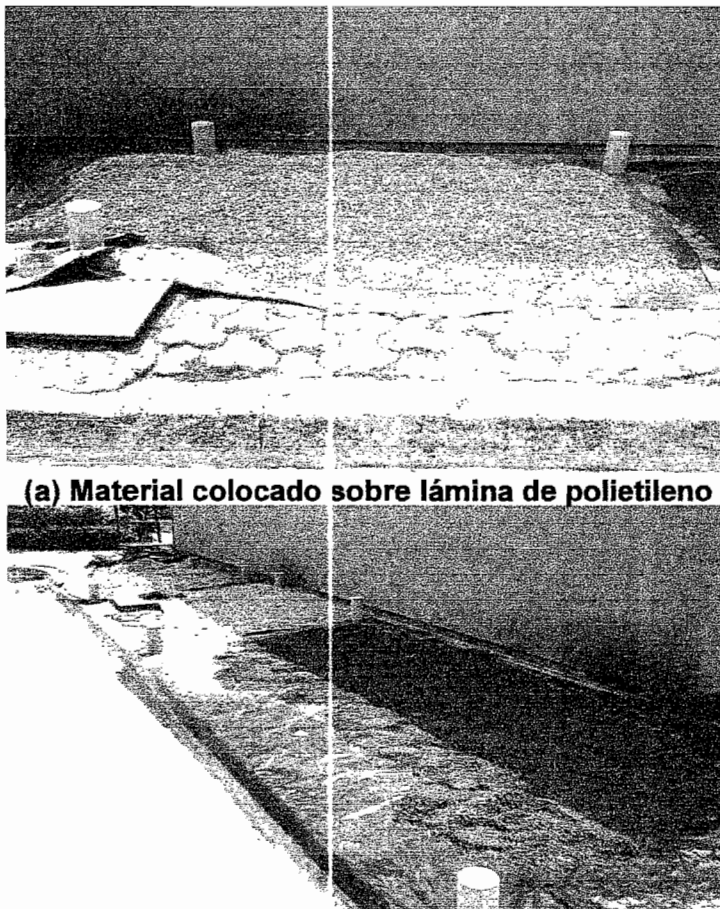


FIGURA 4.8 Balanza para determinar los pesos retenidos

4.2.2 Condiciones de humedad de los agregados.

4.2.2.1 Secado al aire.

Los agregados que son utilizados en el diseño del HCP fueron secados al aire de manera natural, es decir mediante exposición al sol, los agregados son tendidos sobre láminas de polietileno, procurando extenderlos lo mejor posible para que el secado se produzca de una manera más rápida y efectiva, de esta manera el agregado contiene una pequeña cantidad de agua sin llegar a saturar su interior.



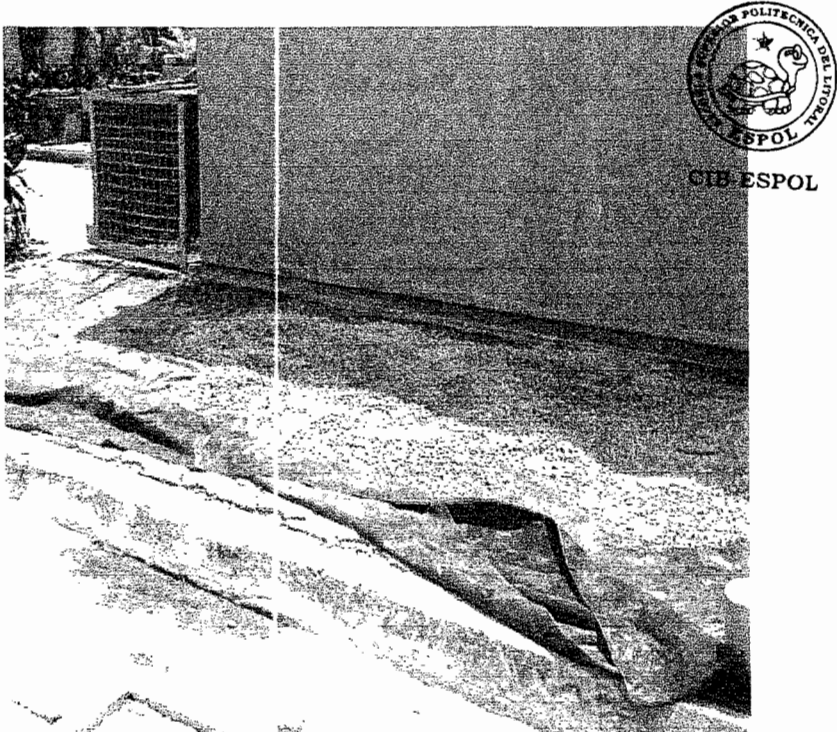
(a) Material colocado sobre lámina de polietileno

(b) Exposición al sol de los agregados

FIGURA 4.9 Secado al aire de agregados para HCP

4.2.2.2 Saturado Superficialmente Seco.

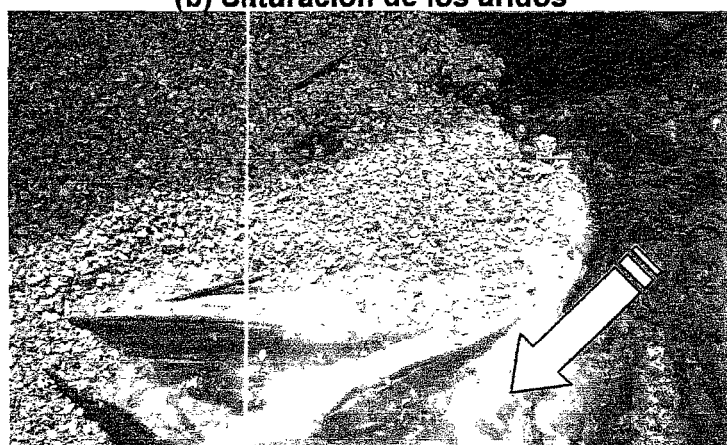
El material utilizado para el FT es colocado y extendido sobre láminas de polietileno y ha sido sometido a una saturación total en agua durante 24 horas. Éste ha absorbido agua, que lo mantiene saturado internamente, tal es el caso, que en este estado el agregado no tiene capacidad de absorber el agua de mezclado ya que se encuentra saturado y no humedece o moja a cualquier material en contacto con el mismo. Esta condición del árido es temporal por ello es almacenado en reservorios plásticos cubiertos por una manta humedecida, lo cual se puede apreciar en la siguiente secuencia gráfica.



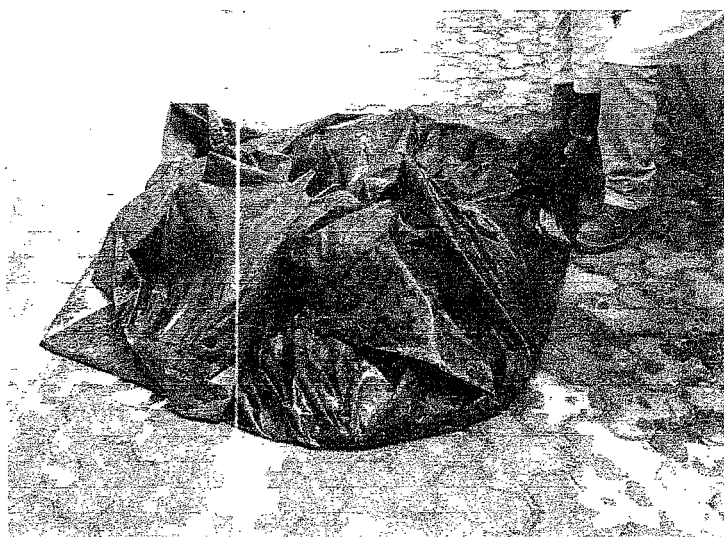
(a) Material extendido sobre láminas de polietileno



(b) Saturación de los áridos



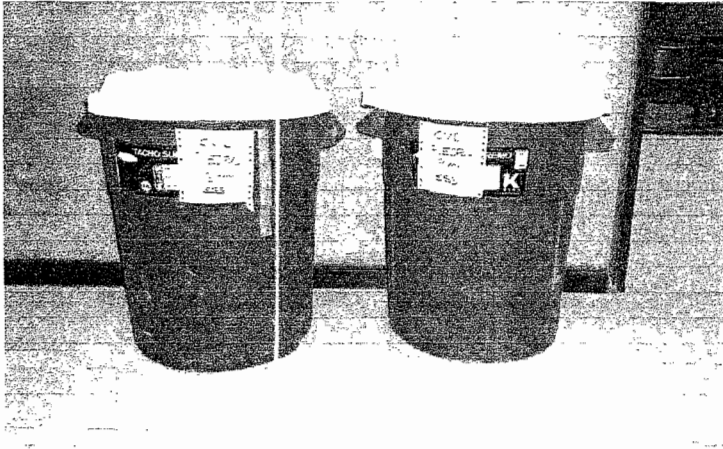
(c) Escurrimiento de agua excedente



(d) Saturación durante 24 h.



(e) Tendido del agregado para ser almacenado



(f) Almacenamiento en recipientes plásticos

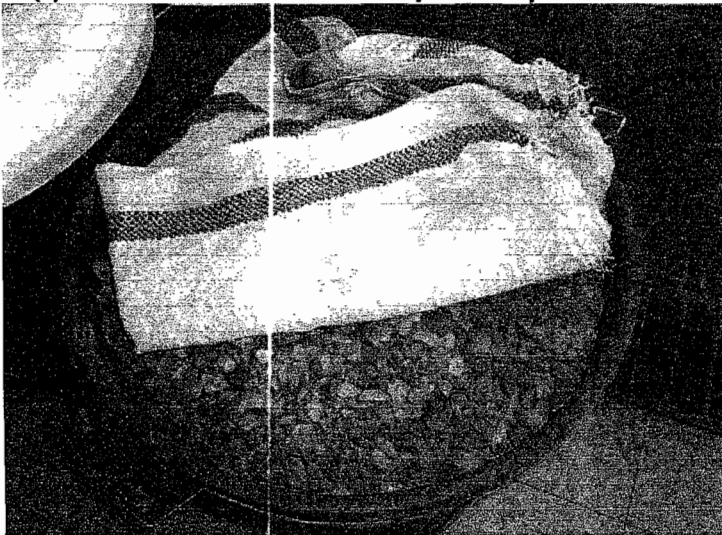


FIGURA 4.10 Secuencia de saturación superficialmente seca de agregados

4.2.3 Pruebas Proctor (ASTM D1557-02).

4.2.3.1 Objetivo

El objetivo de estas pruebas es determinar, el porcentaje de arena de trituración adecuado, la densidad seca máxima y la humedad óptima para el diseño patrón del HCP, para lo cual el ensayo de compactación Proctor será repetido varias veces utilizando una dosificación base cuya única variable es el porcentaje de arena de trituración, manteniendo los demás componentes constantes como el cemento y agregado grueso.

De esta manera mediante un estudio comparativo de la gama de pruebas Proctor se podrá determinar el porcentaje óptimo de arena triturada que ofrezca la máxima densidad seca.



CIB-ESPOL

4.2.3.2 Equipos utilizados.

- Los moldes, deben ser cilíndricos de paredes sólidas, fabricados con metal y en las dimensiones y capacidades mostradas posteriormente. Deben tener un conjunto de collar ajustable aproximadamente de 60 mm. (2 3/8") de altura, que permita la preparación de muestras compactadas de la altura y volumen deseados. El conjunto del molde y del collar deben estar contruidos de tal manera que puedan ajustarse libremente a una placa del mismo material, como se observa en la figura 4.11

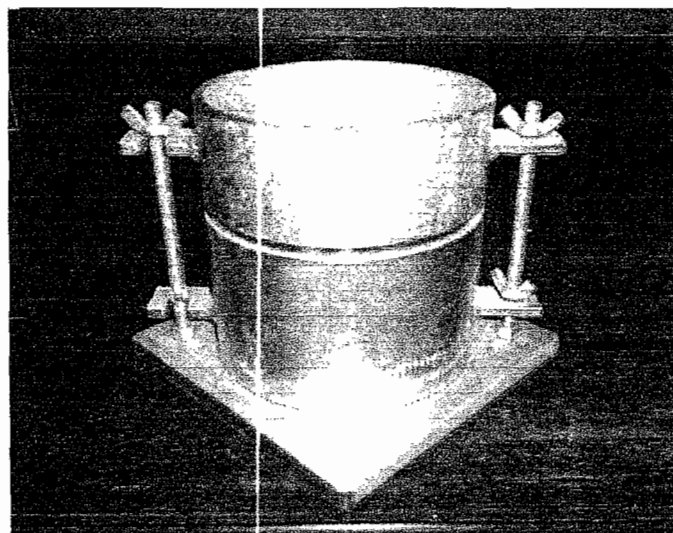


FIGURA 4.11 Vista frontal de un molde metálico

El molde tiene la capacidad de: $2124 \pm 21 \text{ cm}^3$, con un diámetro interior de $152.4 \pm 0.6604 \text{ mm}$. y una altura de $116.43 \pm 0.127 \text{ mm}$. Ver figura 4.12.

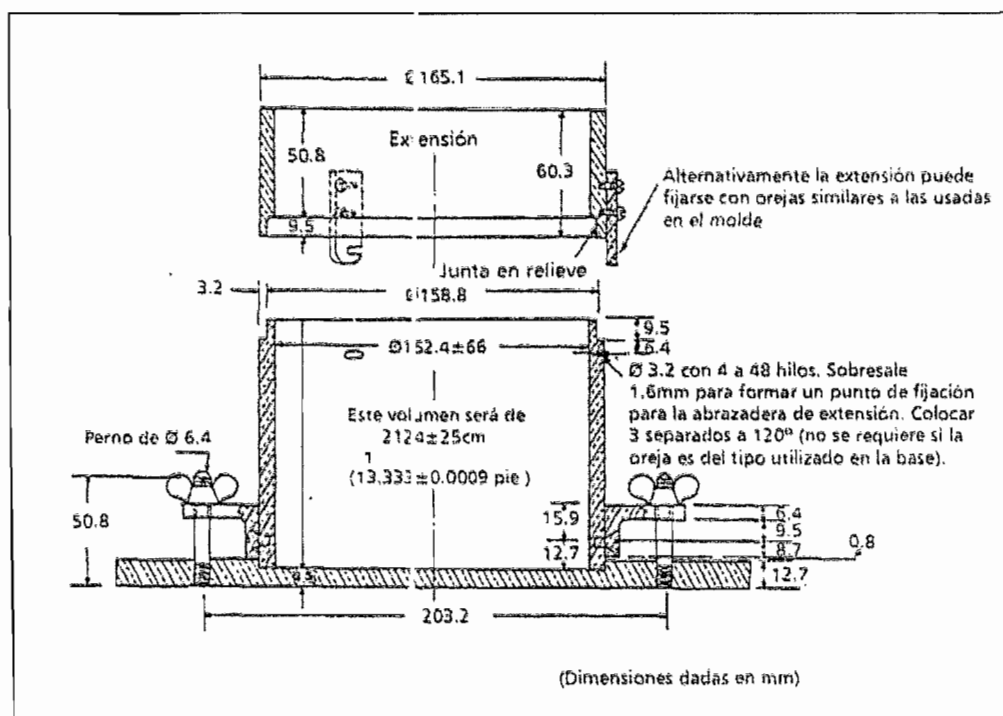


FIGURA 4.12 Dimensiones del molde metálico

- Martillo operado manualmente, el cual es metálico que tenga una cara plana circular de 50.8 ± 0.127 mm. de diámetro y que pese 4.536 ± 0.009 Kg. (10.00 \pm 0.02 lb.). El martillo debe estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de caída del golpe desde una altura libre de 457.2 ± 1.524 mm. por encima de la altura del suelo. La guía debe tener al menos 4 agujeros de ventilación no menores de 9.5 mm. de diámetro y espaciados aproximadamente a 90° y 19 mm. de cada extremo; y debe tener suficiente luz libre, de tal manera que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones.

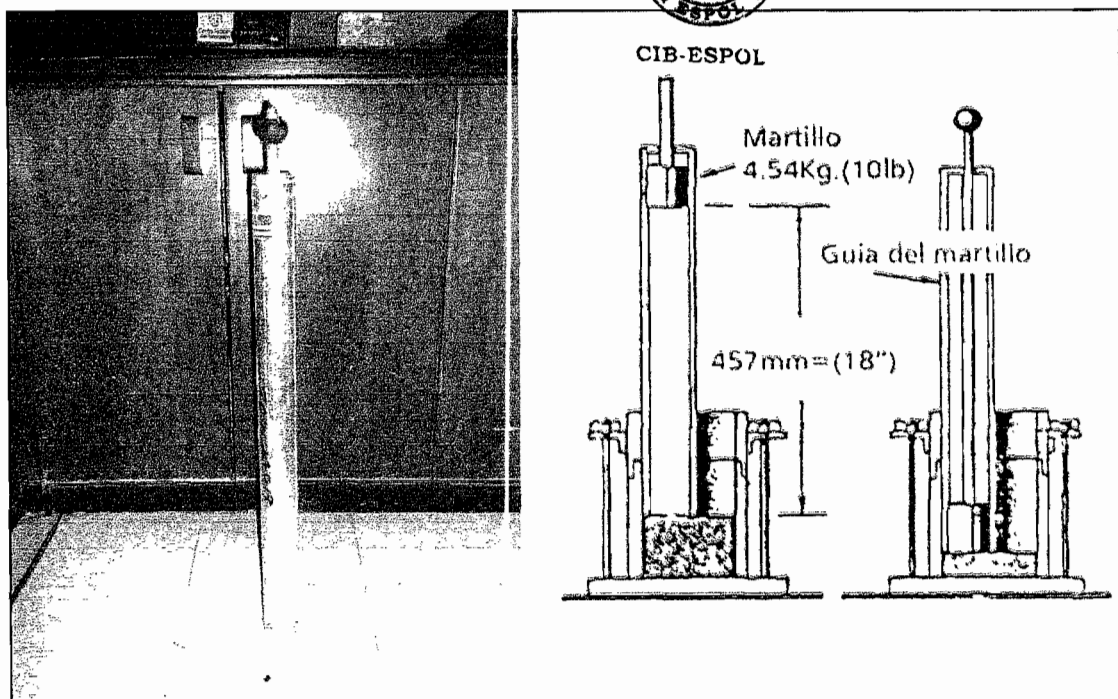


FIGURA 4.13 Dimensiones del martillo metálico

- Balanza, con una precisión de 5g. cuando se usan para pesar moldes de 152 mm. con muestras húmedas compactadas.

- Horno, termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para el secado de las muestras.

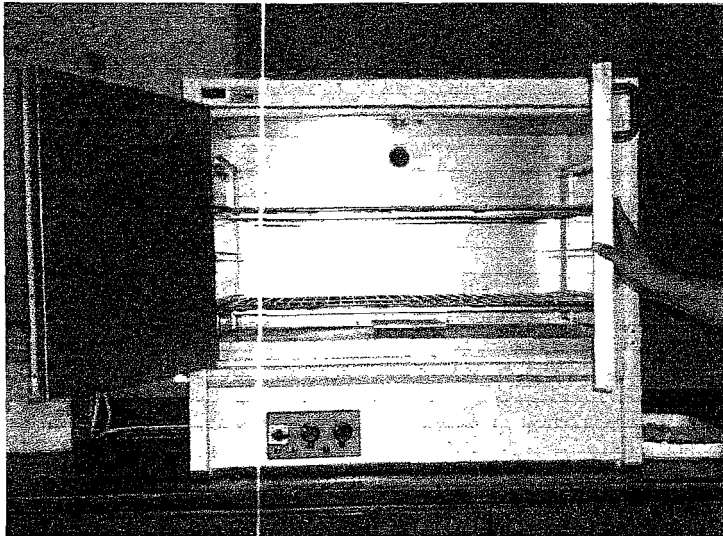


FIGURA 4.14 Horno para secado de muestras

- Regla metálica, de acero endurecido, de borde recto y al menos de 254 mm. de largo. Deberá tener un borde biselado y al menos una cara plan en sentido longitudinal (usada para el corte final de la muestra).
- Herramientas misceláneas para mezclado, tales como cucharas, espátulas, bandejas, y recipientes, para determinar la humedad de las muestras.

4.2.3.3. Procedimiento.

- Cada prueba proctor consta de siete puntos para conformar la curva de compactación, de los cuales tres de ellos deben estar por debajo de la humedad óptima estimada y tres de ellos por sobre la humedad óptima

estimada, para lo cual se toma para cada punto 5,9 Kg. de una muestra mezclada con la cantidad de agua seleccionada en cada punto. (las tablas de dosificación y las proporciones en que se mezclan los agregados y el cemento se encuentran en la sección 5.2 del capítulo 5).

- Cada muestra se debe colocar en una funda plástica para evitar que se pierda humedad, y es muy importante identificar cada una de ellas.



FIGURA 4.15 Muestras depositadas en fundas plásticas

- Pesar el molde de compactación sin incluir el collar.
- Medir las dimensiones internas del molde de compactación para determinar su volumen.
- Tomar una de las muestras y colocarla sobre una bandeja para mezclar nuevamente una vez que ha sido retirada de la funda plástica para ser colocada en el molde de 152 mm. de diámetro (con el collar

ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales, que den una altura total compactada alrededor de 127 mm., compactándose cada capa mediante 55 golpes del martillo distribuidos uniformemente.

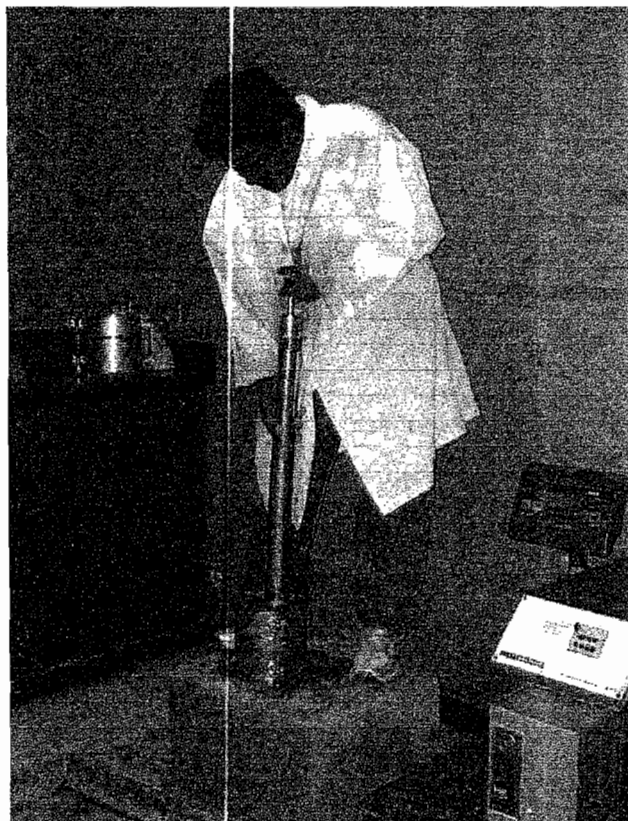


FIGURA 4.16 Procedimiento de Compactación ASTM D1557-02

- Después de la compactación remover el collar de extensión, recortar cuidadosamente el material excedente compactado en la parte superior del molde, mediante la regla con borde recto.
- Pesar el molde con la muestra compactada húmeda en Kg.

- Extraer el material compactado del molde y tomar una muestra no menor a 500 g. para determinar el contenido de humedad, pesar inmediatamente, y poner a secar en un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ por lo menos durante 24 horas o hasta obtener un peso constante.
- Calcular la humedad y el peso unitario seco del material compactado, para cada punto.

Este procedimiento se repetirá en varias ocasiones haciendo variar el porcentaje de arena de trituración.

4.2.4 Preparación de mezclas de hormigón.

4.2.4.1 Procedimiento para mezclado del HCP.

- Los agregados y el cemento deberán ser previamente pesados en balanzas de precisión en las cantidades especificadas en la tabla de dosificación 6.1 (que se encuentra en la sección 6.1.3 del CAPITULO 6) y colocados en bandejas metálicas. De igual forma el agua de mezclado es colocada es un recipiente.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL



FIGURA 4.17 Cemento y Agregados para mezcla del HCP

- El aditivo es pesado y colocado en un vaso de precipitación, ya que posteriormente es utilizado con el agua de mezclado.

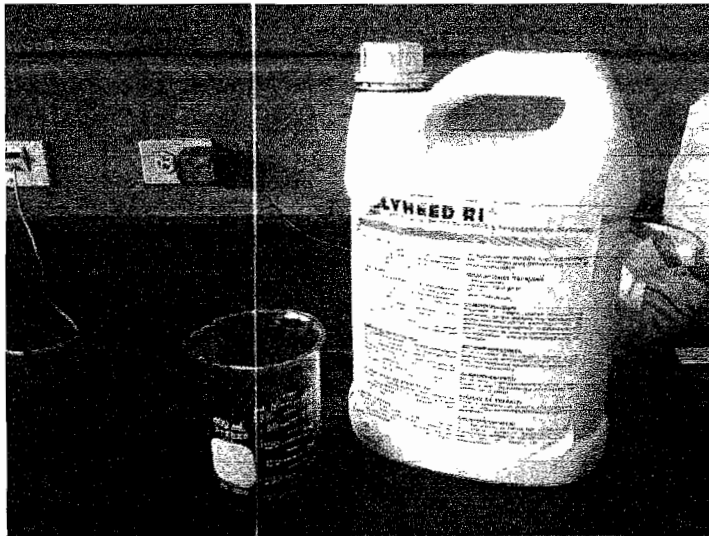


FIGURA 4.18 Pesaje del Aditivo POLYHEED RI

- La mezcladora de tipo artesa fue la que se utilizó para mezclar el HCP, estas mezcladoras ofrecen la posibilidad de observar el hormigón en ellas, y por lo tanto ajustar la mezcla en algunos casos.

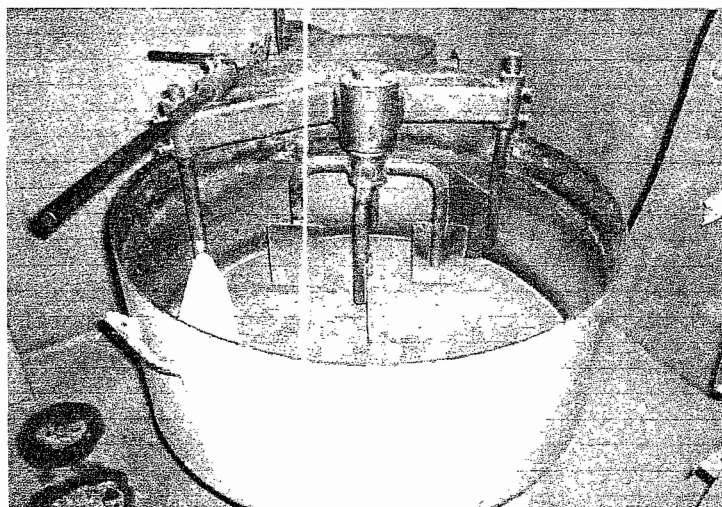


FIGURA 4.19 Mezcladora de artesa

Las paredes de la artesa deben ser humedecidas con un paño previo a la colocación de los agregados, evitando dejar agua libre en las mismas o en el fondo.

- Antes de empezar la rotación de la mezcladora se debe introducir el agregado grueso. Se pone en funcionamiento la mezcladora, al cabo de unas cuantas revoluciones se adiciona el agregado fino y posteriormente el cemento, una vez que se obtiene una mezcla homogénea de estos materiales se agrega el agua aproximadamente las dos terceras partes de lo pesado.
- Finalmente el aditivo debe agregarse simultáneamente con la última parte de agua de mezclado, nunca se añade directamente al cemento o a los agregados.

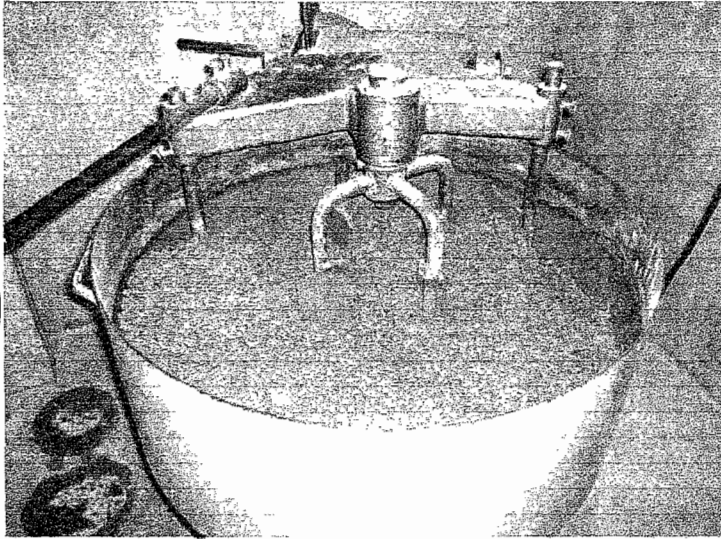


FIGURA 4.20 Mezclado del HCP

Al ser este un hormigón seco se debe tener especial cuidado al momento de agregar el agua, como medida de precaución la mezcla no debe tener un aspecto brillante o pegarse a las aspas de la mezcladora ya que esto indica que hay agua en exceso.

- Si la consistencia del HCP es la adecuada, los materiales no requerirán un tiempo de mezclado mayor a cinco minutos luego de agregar el aditivo.

4.2.4.2 Procedimiento para mezclado del Fast Track.

- Los agregados, el cemento y la zeolita deberán ser previamente pesados en balanzas de precisión en las cantidades especificadas en la tabla de dosificación 6.2 (que se encuentra en la sección 6.2.1 en el CAPITULO 6) y colocados en bandejas metálicas. De igual forma el agua de mezclado es colocada en un recipiente.



FIGURA 4.21 Cemento, Agregados, Zeolita y Agua para mezcla del FT

- El aditivo es pesado y colocado en un vaso de precipitación o una probeta, ya que posteriormente es utilizado directamente sobre la mezcla del FT.



FIGURA 4.22 Pesaje del aditivo HIPERMIX

- La mezcladora de tipo basculante fue la que se utilizó para mezclar el FT, tienen un tambor cónico o en forma de olla con espas en el interior, la descarga del FT se realiza al rotar el tambor basculante.

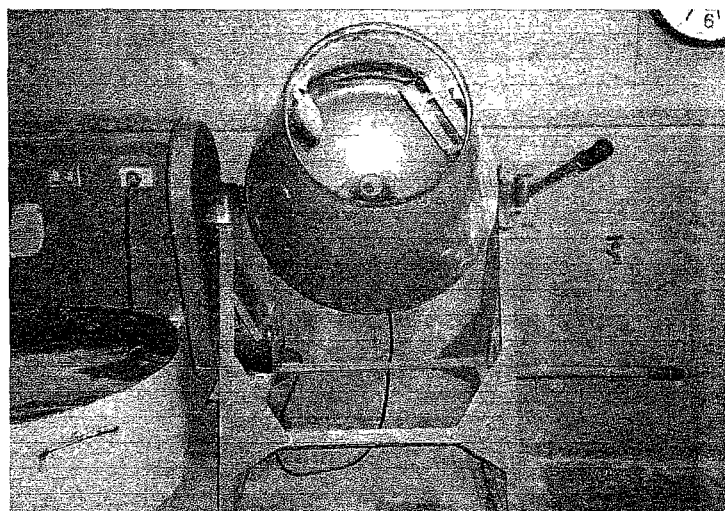


FIGURA 4.23 Mezcladora Basculante

Las paredes de la mezcladora deben ser humedecidas con un paño previo a la colocación de los agregados, evitando dejar agua libre en las mismas o en el fondo.

- Antes de empezar la rotación de la mezcladora se debe introducir el agregado grueso. Se pone en funcionamiento la mezcladora, al cabo de unas cuantas revoluciones se adiciona el agregado fino, el cemento, y posteriormente la zeolita.

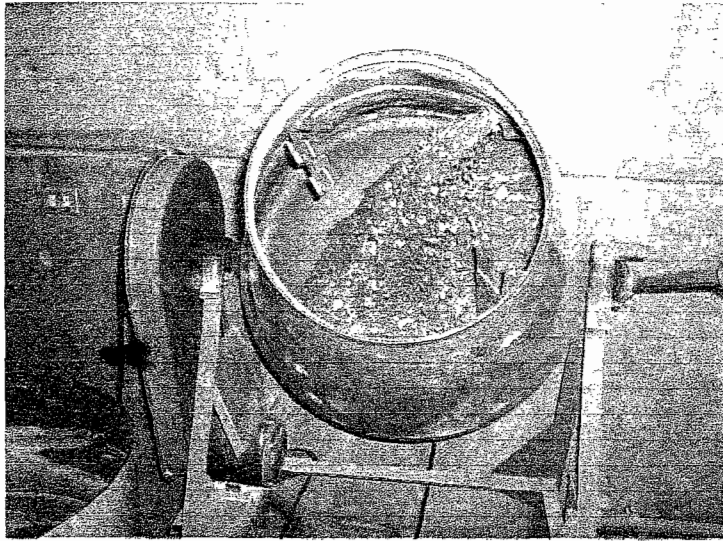
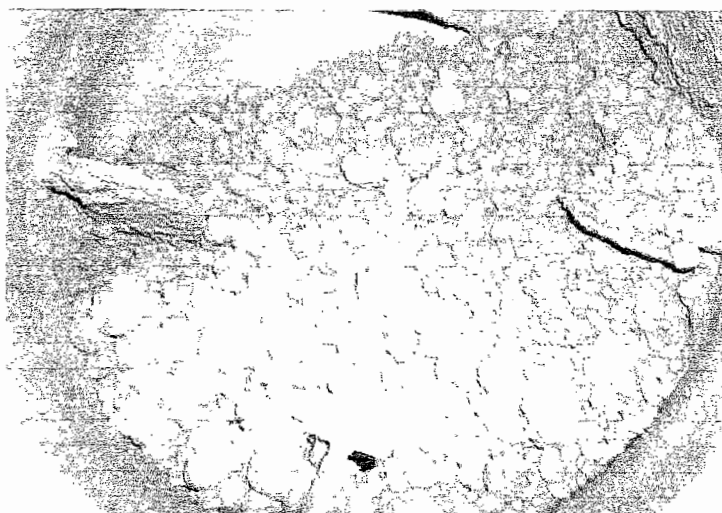
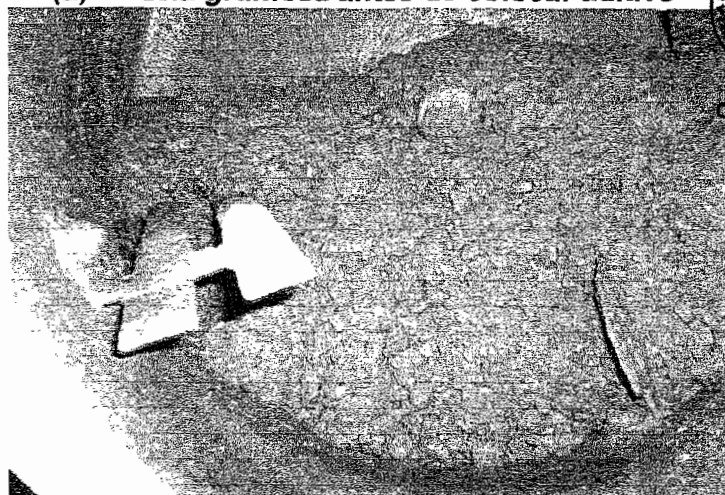


FIGURA 4.24 Mezcla de Agregados del Fast Track

- Una vez que se obtiene una mezcla homogénea de estos materiales se agrega el agua de manera pausada para observar el comportamiento de la mezcla y esperar aproximadamente cuatro minutos hasta que esta sea absorbida por los materiales.
- Finalmente el aditivo es colocado directamente sobre la mezcla, y su efecto es apreciable al cabo de unos minutos de haber sido colocado como se observa en la figura 4.25 en la sección a, donde aun no se ha colocado el aditivo y el aspecto que presenta la mezcla es grumoso y poco trabajable, mientras en la parte b, se observa una mezcla más fluida es decir con una mejor trabajabilidad una vez que se ha colocado el aditivo súper plastificante y reductor de agua.



(a) Mezcla grumosa antes de colocar aditivo



(b) Mezcla con fluidez después de colocar el aditivo

FIGURA 4.25 Efecto del aditivo sobre la mezcla del Fast Track



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

Al finalizar el mezclado, se realizó una prueba de fluidez, la cual fue desarrollada en Alemania en 1933, es cubierta por la norma BS 1881: Parte 105: 1984. En los años recientes, esta prueba se ha utilizado más ampliamente puesto que es apropiada para concreto de alta y muy alta trabajabilidad como es el caso del Fast Track.

El equipo utilizado es una mesa metálica, esta mesa se abisagra a un lado de una placa base, siendo la mesa cuadrada de 70 cm. por lado. La parte superior se puede levantar hasta un tope, de modo que el borde libre se eleve 4cm.

Otros elementos utilizados son un cono truncado de 20 cm. de alto, con un diámetro inferior de 20 cm. y un diámetro superior de 13 cm. y un apisonador de madera.

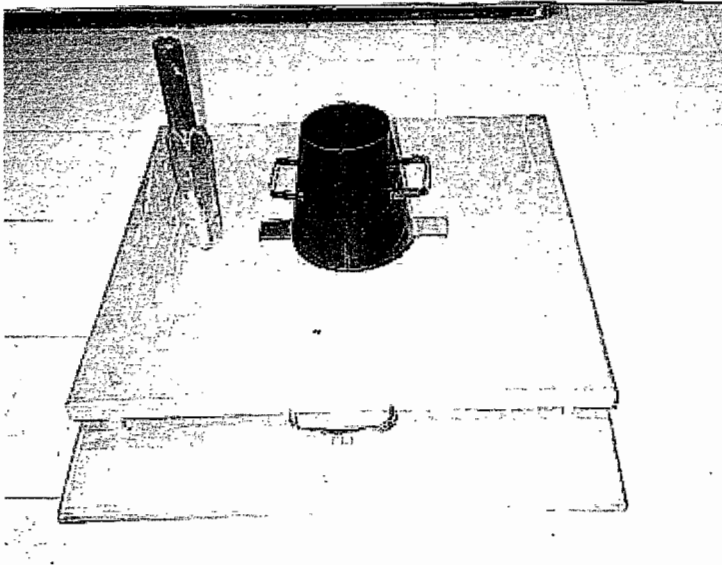


FIGURA 4.26 Elementos utilizados en la prueba de fluidez

- La mesa superior se humedece, se coloca el cono truncado en el centro y se procede a llenar con el hormigón el cual es ligeramente asentado con el apisonador de madera.

- Se quita el exceso de concreto, se limpia la mesa superior circundante, y se levanta directamente el cono (en nuestro caso sin producir la caída libre de la mesa).

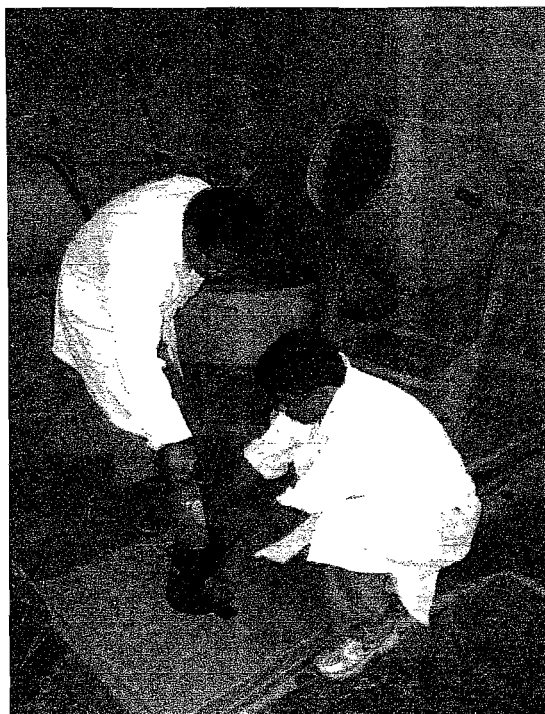


FIGURA 4.27 Procedimiento de llenado del molde

- Como consecuencia, el hormigón se extiende, y se mide la extensión máxima paralela a los bordes de la mesa. El promedio de estos dos valores, representa la fluidez.

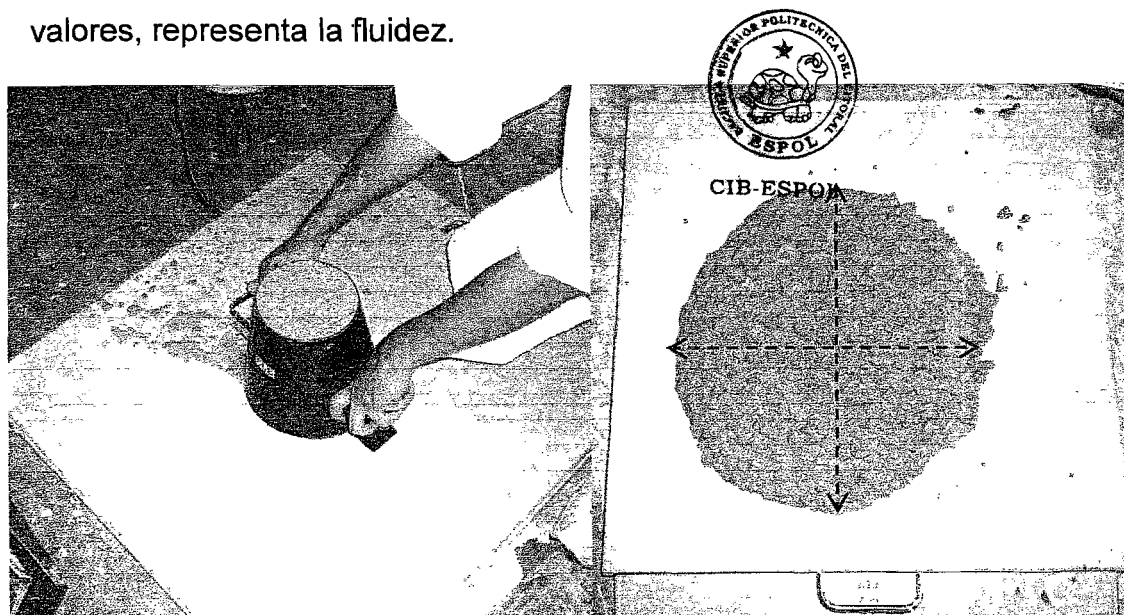


FIGURA 4.28 Extensión del hormigón sobre la mesa de flujo

4.2.5 Elaboración en laboratorio de muestras de hormigón.

La elaboración de los especímenes (probetas) debe empezar, como máximo, 15 minutos después de la obtención de la mezcla de hormigón realizada en el laboratorio.

La probeta estándar para la resistencia a compresión del concreto con agregado de dimensión máxima de 50 mm. o menor es un cilindro de 150 mm. de diámetro por 300 mm. de altura

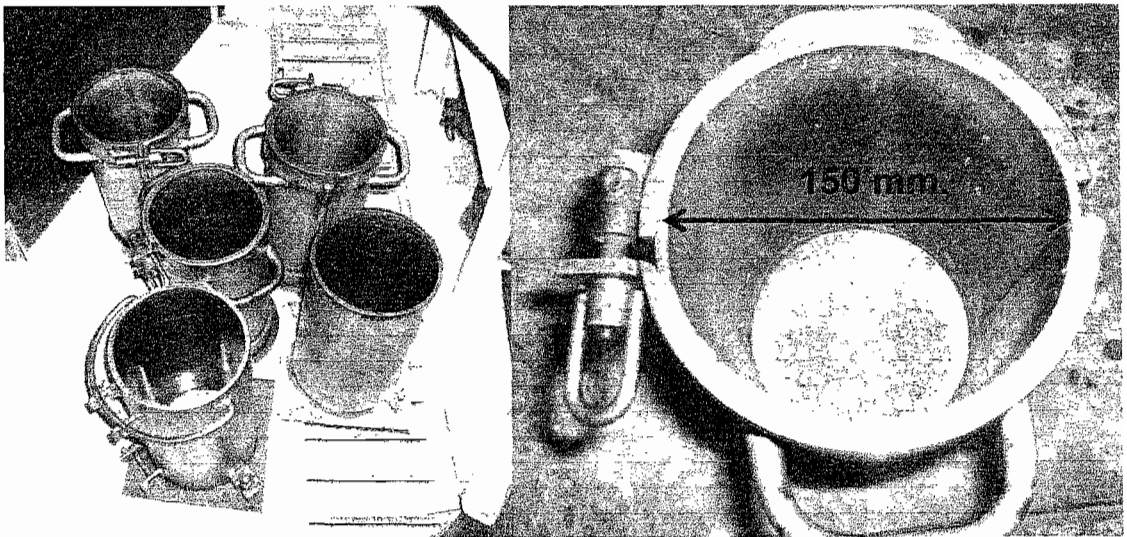


FIGURA 4.29 Molde metálico de 150 x 300 mm.

Estos moldes por estar en contacto con el hormigón deben ser de acero, hierro forjado o de otro material no absorbente y que no reaccione con el hormigón utilizado en los ensayos.



CIB-ESPOL

El molde de cilindros de 100 mm. de diámetro por 200 mm. de altura está siendo utilizado comúnmente para los hornigones de alta resistencia que contienen agregados de tamaño máximo de 19 mm.



FIGURA 4.30 Molde metálico de 100 x 200 mm.

Las vigas para el ensayo de resistencia a flexión tienen 150 x 150 mm. de sección transversal para hornigones con agregados de hasta 50 mm. La longitud de las vigas debe ser, por lo menos, tres veces la profundidad de la viga más 50 mm. o un total de 500 mm. para la viga de 150 x 150 mm,

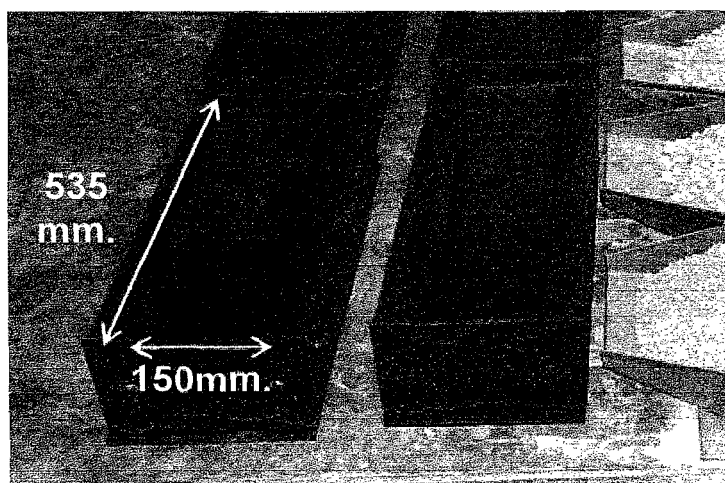


FIGURA 4.31 Molde metálico viga 150 x 150 x 500 mm.

Las viguetas para el ensayo de retracción por secado tienen una sección transversal de 100 x 100 mm. y aproximadamente 285 mm. de longitud para hormigones con agregados de hasta 50 mm.

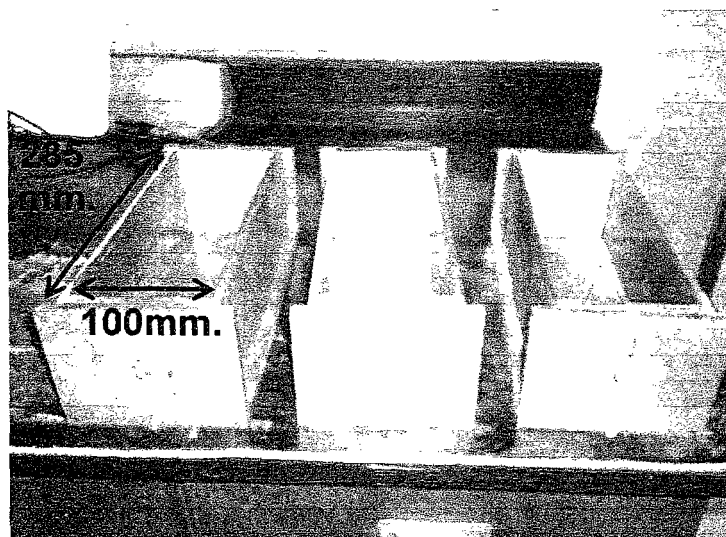


FIGURA 4.32 Molde metálico vigueta 100 x 100 x 285 mm.

4.2.5.1 Elaboración de especímenes de HCP.

Para realizar los distintos ensayos al HCP a diferentes edades se elaboraron tres grupos de probetas, los cuales son:

Probetas cilíndricas de 150 x 300 mm. para ensayos de compresión simple, tracción por compresión diametral, esclerometría, velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad.

Vigas de 150 x 150 x 500 mm. para ensayos de flexión y velocidad de pulso ultrasónico.

Viguetas de 100 x 100 x 285 mm. para el ensayo de retracción del hormigón por secado.

La elaboración de las probetas cilíndricas requiere la utilización de un martillo eléctrico de compactación HILTI, ya que el HCP por ser un hormigón seco necesita una mayor energía de compactación para ser moldeado así como para simular las condiciones de colocación en obra en donde se utiliza un rodillo, el martillo eléctrico utiliza una extensión en forma de disco la cual encaja en el diámetro de los cilindros a moldear.

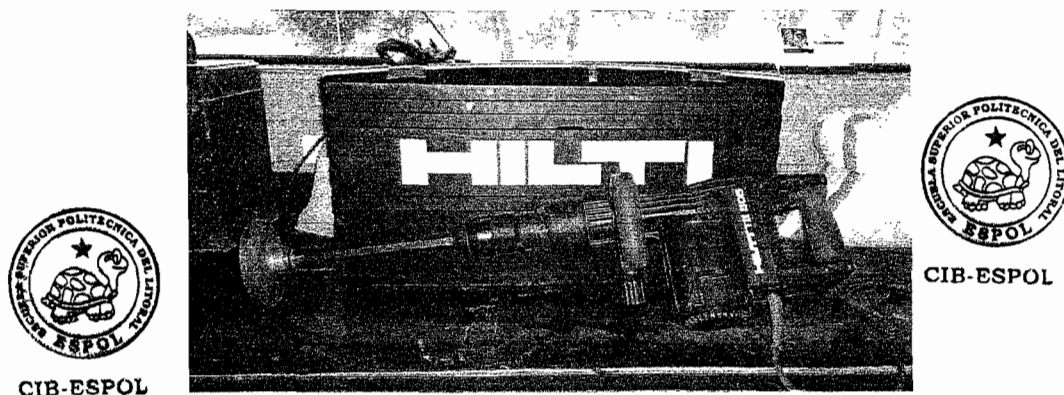


FIGURA 4.33 Martillo eléctrico de compactación

Como paso previo para moldear las probetas cilíndricas, los moldes deberán ser lubricados con aceite para evitar que el hormigón sea adhiere a ellos y haga complicado el desencofrado.

Tomando como punto de partida la mezcla de HCP óptima obtenida según el ensayo proctor ASTM D1557-02 procedemos al llenado de los moldes el cual se realiza en tres capas (de acuerdo a la norma ASTM

C1435) de la misma altura, cada capa debe ser compactada con el martillo eléctrico durante 45 segundos, de manera perpendicular a la superficie donde se este compactando la cual debes ser sólida y uniforme, no es necesario utilizar el peso del cuerpo contra el martillo, ya que el propio peso de éste es suficiente para lograr una buena compactación, entre cada capa es necesario hacer un rayado de la superficie con una espátula para lograr una adherencia con la siguiente capa.

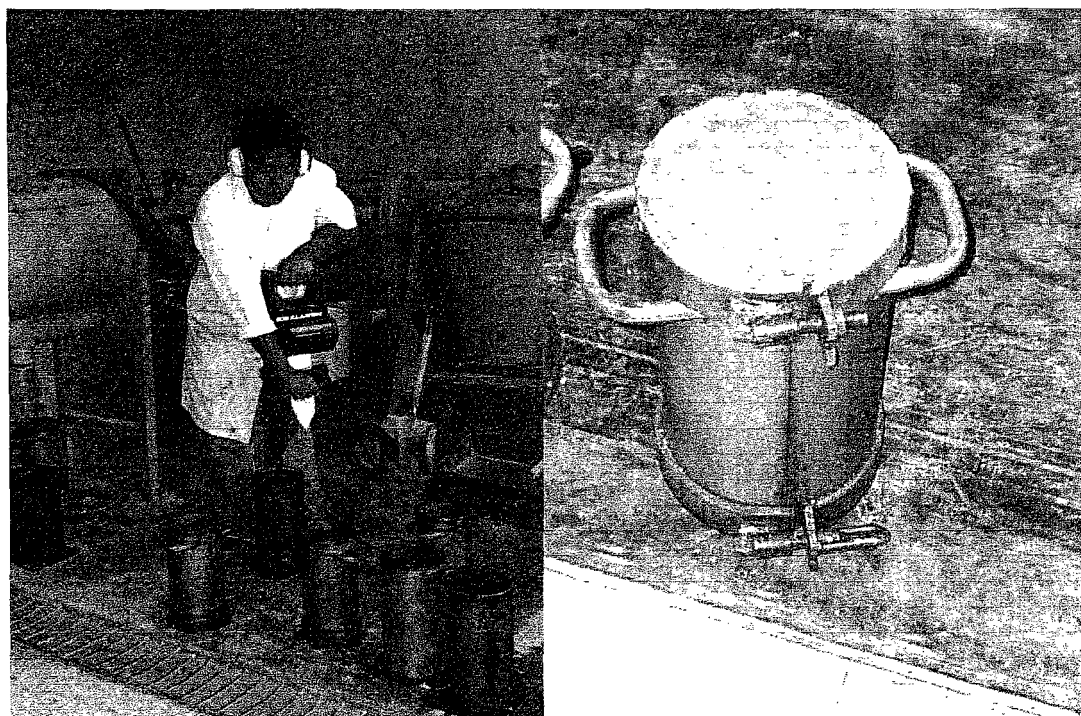


FIGURA 4.34 Procedimiento ASTM C1435-99 de Compactación de cilindros

Después de la compactación de la última capa la superficie debe quedar plana y pareja a nivel del borde del cilindro.

Se debe tener cuidado en no aplicar una excesiva compactación para evitar que la superficie tenga una textura totalmente cerrada.

Las siguientes probetas moldeadas son las vigas 150 x 150 x 500 mm. se llenarán con dos capas compactadas respectivamente con el martillo eléctrico, en esta ocasión utilizará una extensión de sección rectangular que encaja en el molde prismático, antes de colocar la segunda capa la primera debe ser rayada con una espátula. El acabado de las vigas debe ser al nivel y paralelo al borde del molde.

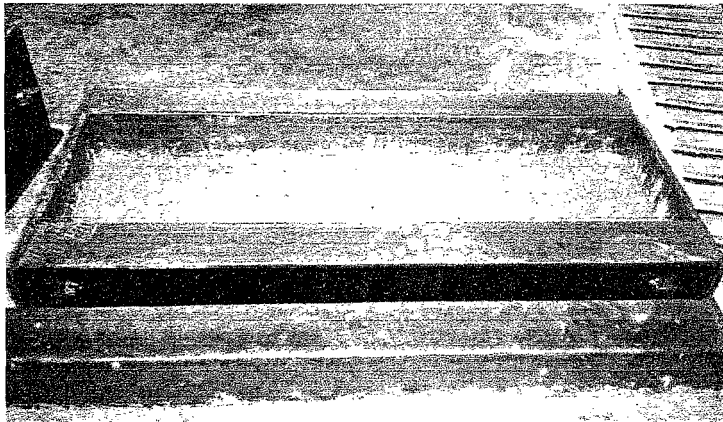


FIGURA 4.35 Procedimiento de llenado de vigas

Finalmente para el HCP se elaboraron viguetas de dimensiones 100 x 100 x 285 mm., previamente lubricados con aceite, en este caso se utilizó un martillo eléctrico KANGO, mostrado en la figura al cual fue necesario adaptar una extensión de menor sección que la utilizada para compactar las vigas ya que las dimensiones del molde también son considerablemente menores.

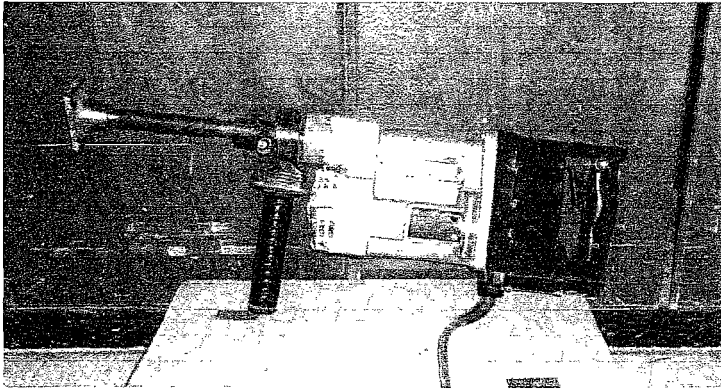


FIGURA 4.36 Martillo eléctrico KANGO

Ya que los moldes originalmente no fueron diseñados para grandes energías de compactación, y constan de dos pernos de sujeción, fue necesario asegurarlos con bandas de caucho firmemente colocadas alrededor del molde para evitar que este se abriera o deforme al momento de compactar el hormigón en su interior.



FIGURA 4.37 Moldes asegurados con bandas de caucho

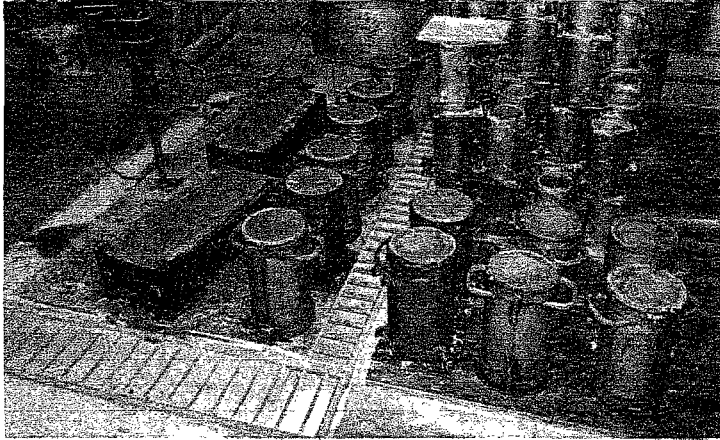
Al igual que en los casos anteriores los moldes son lubricados con aceite, y de manera similar al caso de las vigas estos moldes también serán llenados en dos capas bien compactadas con el martillo vibratorio eléctrico a lo largo de toda su superficie, antes de colocar la segunda capa la primera debe ser rayada con una espátula.



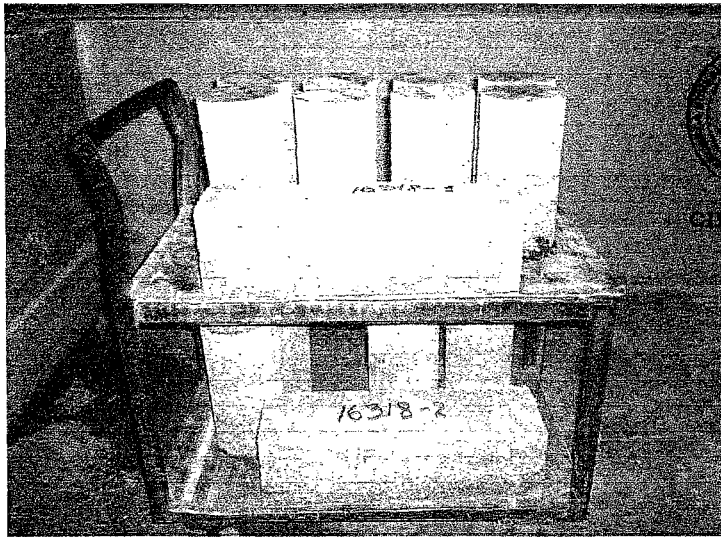
FIGURA 4.38 Elaboración de viguetas de retracción

Una vez que las muestras han sido elaboradas para evitar la evaporación de agua del hormigón sin endurecer, las muestras deben ser cubiertas inmediatamente después del acabado, preferiblemente con una lámina de plástico dura e impermeable.

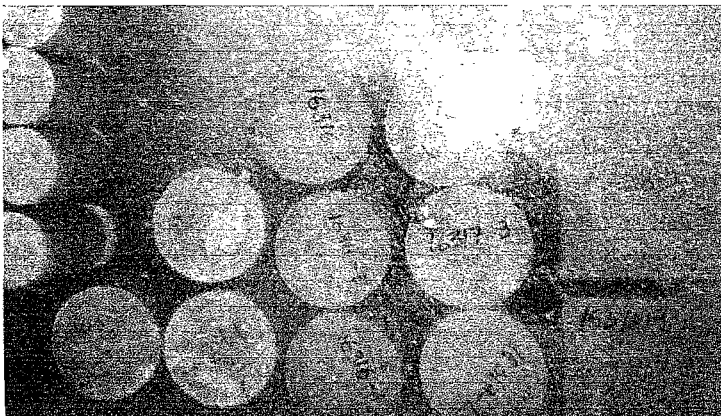
Las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo de 24 horas después de haber sido elaboradas.



(a) Muestra de HCP antes de ser desmoldadas



(b) Muestras desencofradas de HCP



(c) Muestras codificadas en piscina de curado

FIGURA 4.39 Secuencia de desencofrado y almacenamiento de muestras

Como se aprecia en la secuencia gráfica de la figura 4.39 una vez que las muestras de HCP han sido desencofradas estas deben ser perfectamente codificadas para ser fácilmente identificadas y organizadas, una vez hecho esto las muestras se deben mantener en condiciones de humedad hasta el momento del ensayo.

La condición de humedad debe lograrse por inmersión de la muestra en agua. No deben exponerse los especímenes a condiciones de goteo o de corrientes de agua, deben evitarse que se sequen las paredes de la muestra luego del período de curado antes de ser ensayadas.

4.2.5.2 Elaboración de Especímenes de Fast Track.

Para realizar los distintos ensayos al HCP a diferentes edades se elaboraron cuatro grupos de probetas, los cuales son:

Probetas cilíndricas de 100 x 200 mm. para ensayos de compresión simple, tracción por compresión diametral, velocidad de pulso ultrasónico.

Probetas cilíndricas de 150 x 300 mm. para ensayos de módulo de elasticidad.

Vigas de 150 x 150 x 500 mm. para ensayos de flexión y velocidad de pulso ultrasónico.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

Viguetas de 100 x 100 x 285 mm. para el ensayo de retracción del hormigón por secado.

La elaboración de las probetas cilíndricas es sencilla, los moldes deben ser lubricados con aceite, los cilindros se rellenaran dependiendo de su tamaño, los cilindros de 150 x 300 mm., se llenarán mediante tres capas de igual espesor, mientras que los cilindros de 100 x 200 mm. requieren dos capas de igual espesor, cada capa debe ser compactada con 25 golpes de varilla de 16 mm. y 10 mm. según el diámetro del molde y con aproximadamente 12 a 15 golpes con martillo de goma distribuidos en toda la superficie para evitar oquedades o porosidades en el espécimen como se muestra en la figura a continuación.

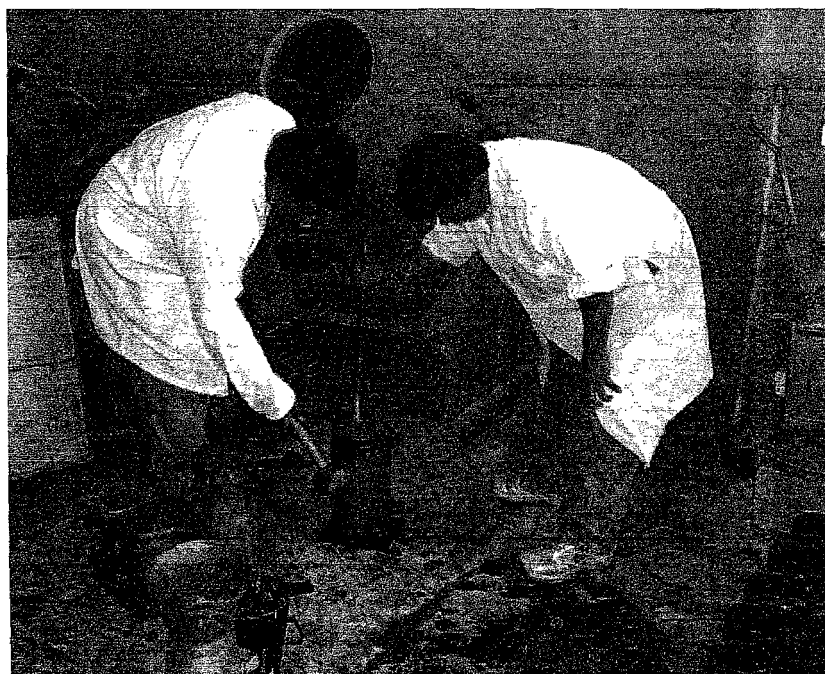
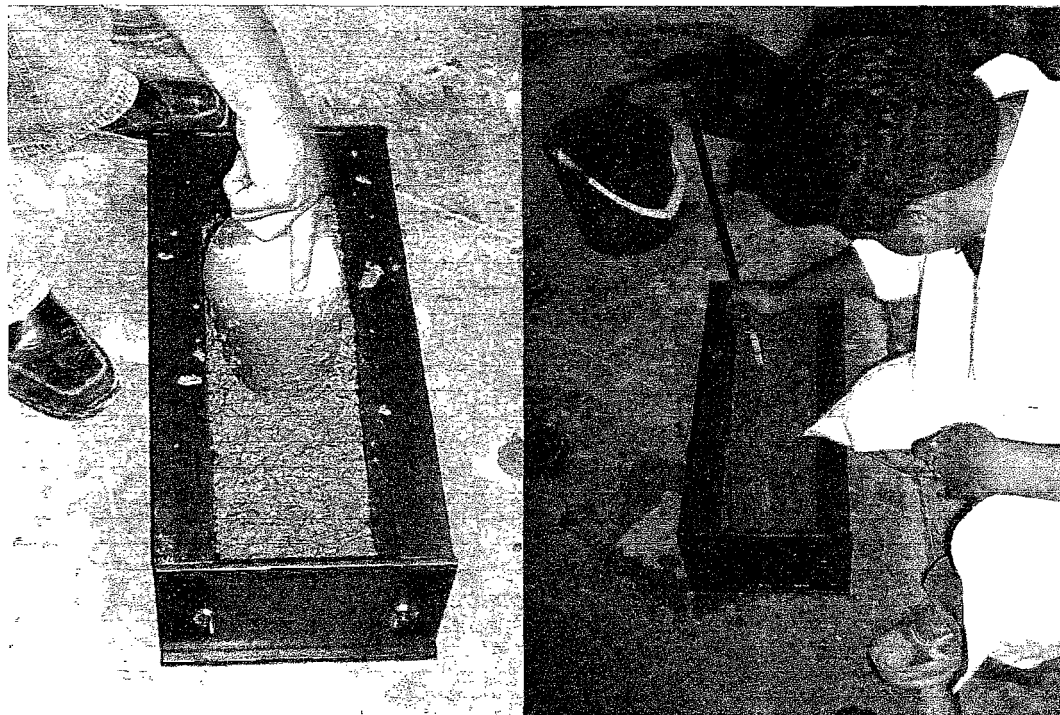
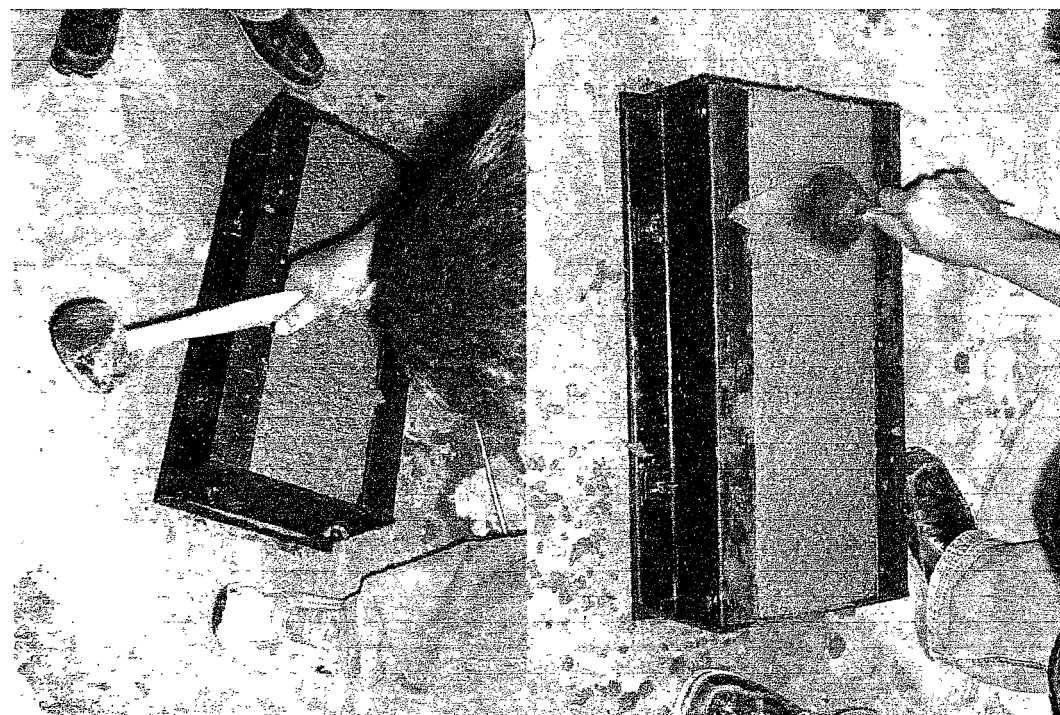


FIGURA 4.40 Procedimiento de llenado de cilindros de FT



(a) Llenado y Compactado de la primera capa de la viga de FT



(b) Compactado y Acabado de la segunda capa de la viga de FT
FIGURA 4.41 Proceso de elaboración de vigas de FT

La figura 4.41 muestra el procedimiento de llenado de los moldes prismáticos de 150 x 150 x 500 mm., los cuales se llenan en dos capas de igual espesor que son compactadas con 58 golpes con una varilla de 16 mm. de espesor y con golpes de martillo de goma alrededor de la superficie para asegurarnos de minimizar espacios vacíos, la segunda capa debe tener un acabado liso y paralelo al borde del molde.

Este procedimiento de llenado es muy similar al utilizado con los especímenes para las viguetas de retracción, ya que el molde es llenado en dos capas y debido a las características del Fast Track y dimensiones del molde la compactación la logramos únicamente con golpes del martillo de goma.



FIGURA 4.42 Viguetas de retracción con Fast Track

Una vez que las muestras han sido moldeadas deben ser cubiertas con una lámina de plástico impermeable para evitar que las muestras recién moldeadas pierdan humedad.

Las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo de 24 horas después de haber sido elaboradas y su posterior almacenamiento es igual al explicado en la última parte de la sección 4.2.5.1.

4.2.5.3 Elaboración de Especímenes de HCP + FT.

Para aplicar los ensayos que permitan estudiar la adherencia desarrollada entre el HCP y el FT y demostrar que se está frente a una estructura monolítica se elaboraron vigas de 150 x 150 x 500 mm.

Tomando como base un pavimento que en HCP requiere una carpeta de 23 cm. de espesor y asumiendo que se construya con una capa de 16 cm. en HCP y otra de 7 cm. en FT, se elaboraron vigas que se llenaron hasta los $\frac{2}{3}$ de su altura con HCP y el $\frac{1}{3}$ restante con FT.

El procedimiento que se debe seguir empieza por colocar una marca en los moldes 5 cm. por debajo del borde del mismo, luego los moldes lubricados con aceite deben ser ubicados en la posición donde permanecerán hasta el momento de ser desmoldados y cerca de la mezcladora que contiene el hormigón

Luego se procede a llenar al molde con el HCP prácticamente hasta el borde ya que en el momento de utilizar el martillo eléctrico el HCP se compactará quedando aproximadamente 5 cm. por debajo del borde del molde y se podrá ajustarlo más fácilmente a la marca que se ha colocado previamente, se debe tomar en cuenta no excederse en el tiempo de compactación ya que esto creará una textura superficial totalmente cerrada disminuyendo la adherencia entre capas.

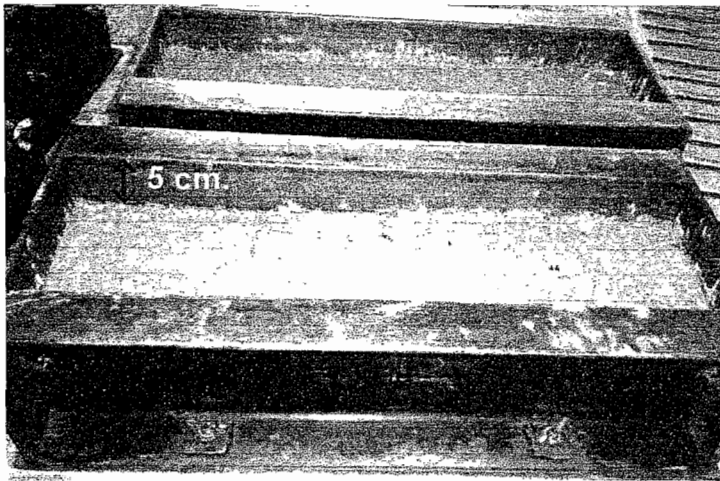


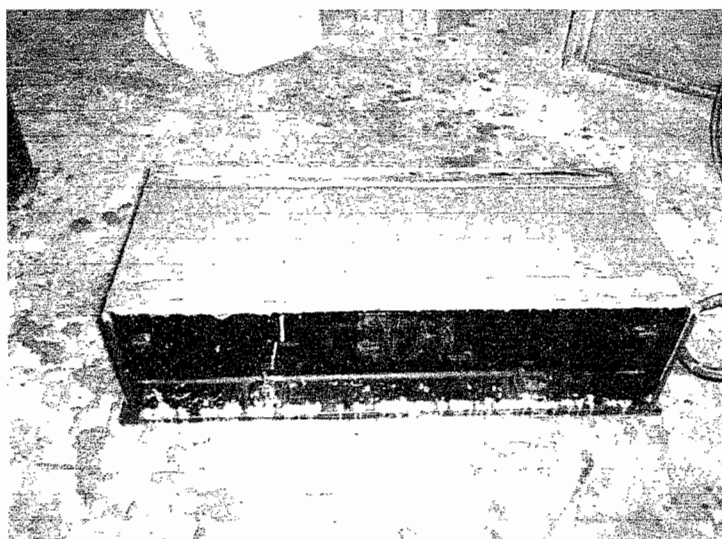
FIGURA 4.43 Llenado de viga con HCP

Luego de colocar esta capa es importante mantenerla limpia, libre de impurezas, no se debe colocar agua, ni ligante alguno, ni texturizarla, simplemente se colocará la capa de FT sobre la de HCP tal como quedó después de ser compactado.

No es necesario preparar los dos tipos de hormigón al mismo tiempo, se puede colocar el HCP y comenzar a hacer la mezcla del FT, sabiendo que

la colocación entre capas solo debe mediar un tiempo muy corto, sin embargo mezclar el FT después de colocar el HCP ayudaría a simular los tiempos de colocación en obra.

Finalmente se coloca el FT y se compactará con golpes con el martillo de goma a lo largo de los bordes del molde, se realiza el acabado con una llana metálica y después de unos minutos los moldes deben ser cubiertos con una lámina plástica para evitar que las vigas pierdan humedad.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

FIGURA 4.44 Capa superior de FT sobre el HCP

Las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo de 24 horas después de haber sido elaboradas y su posterior almacenamiento es igual al explicado en la última parte de la sección 4.2.5.1.

4.2.6 Elaboración de Ensayos.

4.2.6.1 Ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-03).

La más común de todas las pruebas sobre el hormigón endurecido es la prueba de resistencia a la compresión, en parte porque muchas de las características deseables del hormigón están relacionadas cualitativamente con su resistencia, pero fundamentalmente por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del hormigón en el diseño estructural.

Objetivos.

Determinar de manera individual la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de HCP y FT.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste.

Aparatos.

Máquina de ensayo. La máquina de ensayo debe ser de un tipo tal que tenga suficiente capacidad de carga y debe operar mecánicamente y aplicar la carga de una manera continua y no en forma intermitente, y sin choques.

La prensa utilizada en este ensayo pertenece a la marca ELE ADR 3000, aplicándose una velocidad de carga de 2,3 kN./seg. para cilindros de hormigón de 100 x 200 mm. y de 5 kN./seg. para cilindros de hormigón de 150 x 300 mm.



FIGURA 4.45 Prensa "ELE" 3000 kN.

Procedimiento.

El ensayo de compresión de muestras curadas en agua debe hacerse inmediatamente después de que éstas han sido removidas del lugar de curado.

La muestra se debe mantener húmeda utilizando cualquier método, durante el período transcurrido desde su remoción del lugar de curado hasta cuando es ensayada. Debe ensayarse en condición húmeda.

Colocar la muestra sobre la plataforma de la máquina de ensayo

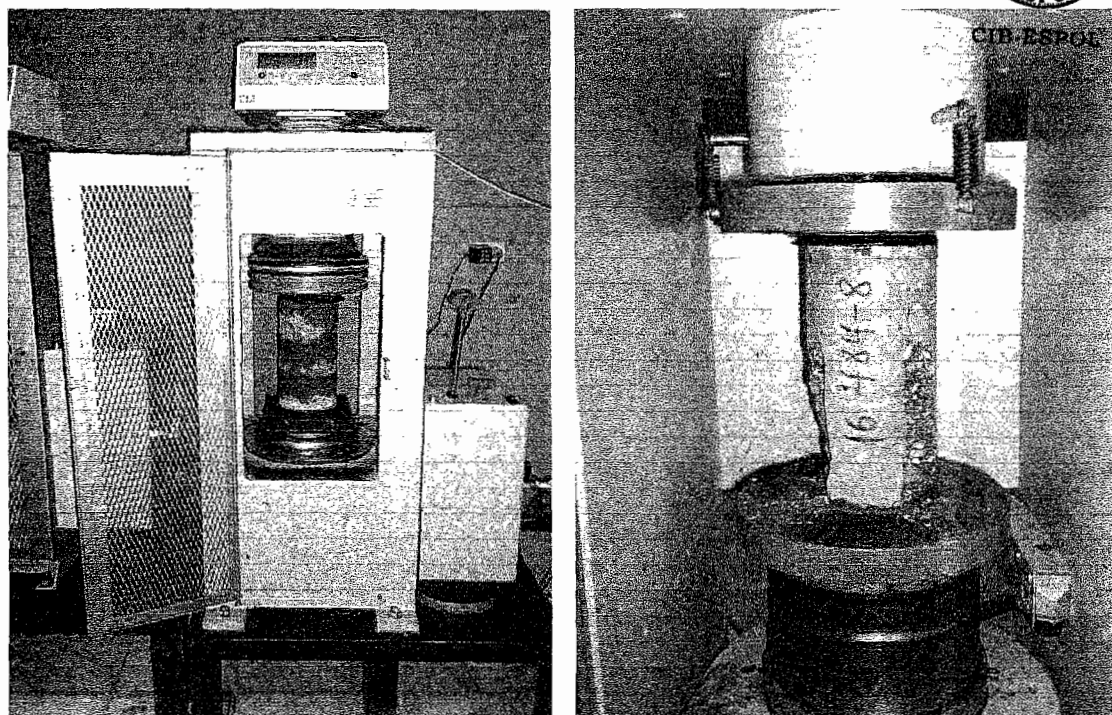


FIGURA 4.46 Procedimiento de rotura (ASTM C39) de muestras de HCP y FT

Aplíquese la carga continuamente sin golpes bruscos, hasta que la muestra falle y regístrese la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo.

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de la norma **ASTM C39/39M-03**.

4.2.6.2 Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496/C496M-04).

En esta prueba, se coloca un cilindro de hormigón, del tipo utilizado para pruebas de compresión, con su eje horizontal entre las platinas de una máquina de pruebas, y se aumenta la carga hasta que ocurra la falla por tensión indirecta en forma de separación a lo largo del diámetro vertical.

Objetivos.

Obtener los esfuerzos de tracción indirecta tanto de cilindros de HCP y FT de manera individual, así como también en núcleos calados en vigas de para estimar la adherencia desarrollada en la interfase HCP+FT.

Aparatos.

Máquina de ensayo. Debe ser de similares características a las mencionadas en la sección 4.2.6.1.

La prensa utilizada en este ensayo pertenece a la marca ELE ADR 2000, aplicándose una velocidad de carga de 0,60 kN./seg. para cilindros de hormigón de 100 x 200 mm. y de 1,3 kN./seg. para cilindros de hormigón de 150 x 300 mm.

Platina de apoyo suplementaria. Si el diámetro o la mayor dimensión de las placas de apoyo, inferior y superior son menores que la longitud del

cilindro para ensayo, debe usarse una platina suplementaria de acero maquinado.

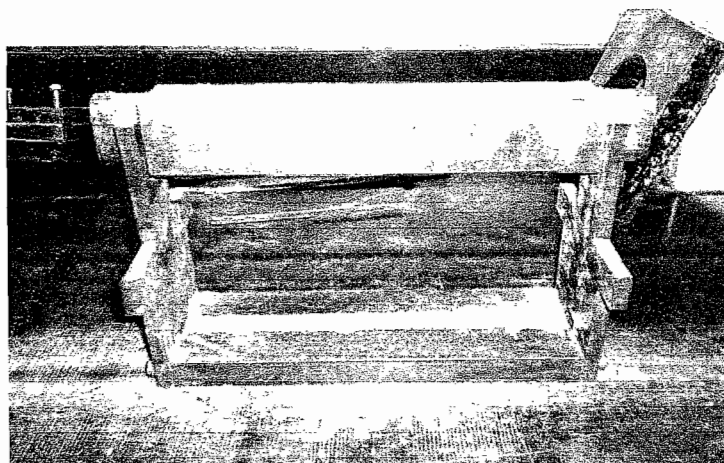


FIGURA 4.47 Platina de apoyo suplementaria

Listones de apoyo. Deben ser dos tiras de cartón o dos listones de madera triplay, de 3 mm. de espesor y 25 mm. de ancho .

Procedimiento.

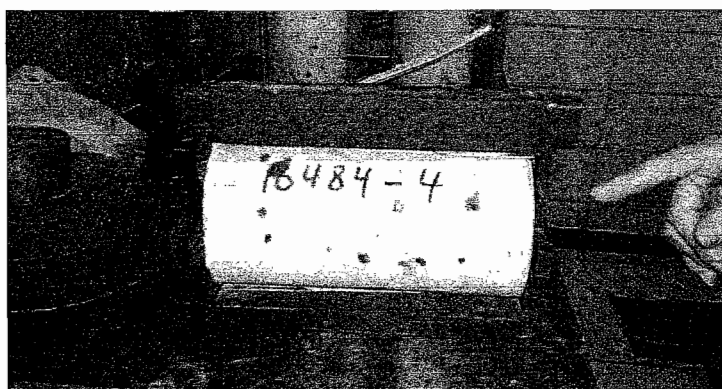


FIGURA 4.48 Colocación del cilindro de FT en la platina

Se coloca un listón de apoyo a lo largo del centro de la parte inferior de la platina de apoyo. Se pone el cilindro sobre el listón, de tal manera que el punto de tangencia de las dos bases esté concentrado sobre la lámina de apoyo. Se coloca el segundo listón longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo en forma similar al anterior.

Se aplica la carga al cilindro en forma continua evitando impactos, a velocidad constante mientras se rompe el cilindro.

Se anota la carga máxima de la máquina en el momento de la rotura.

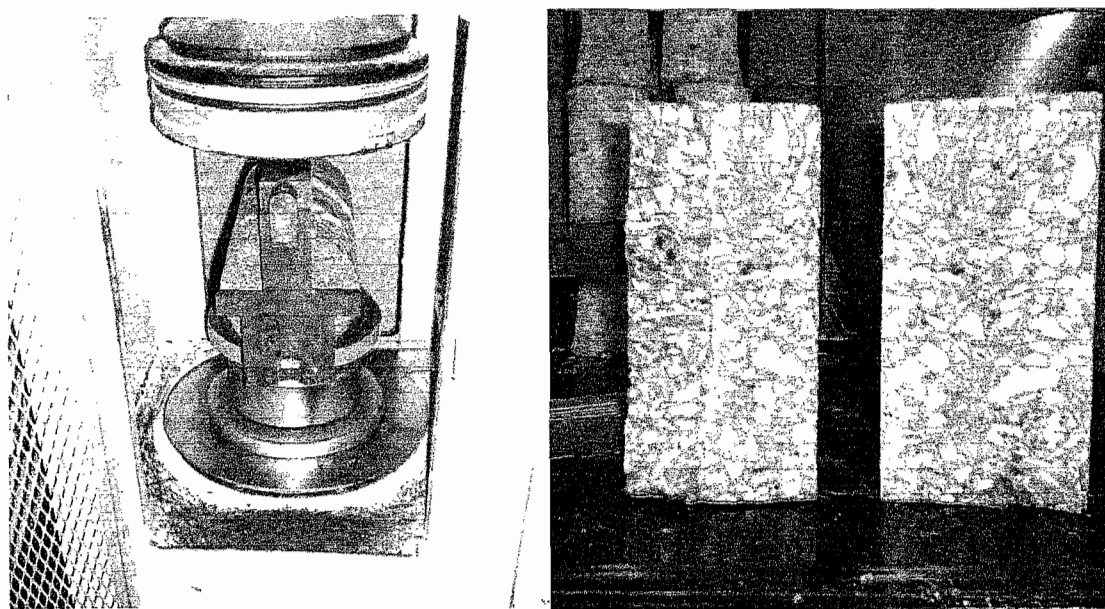


FIGURA 4.49 Procedimiento de rotura (ASTM C496) de muestras de HCP, FT y núcleos HCP+FT

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de la norma **ASTM C496/C496M-04**).



4.2.6.3 Ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C78-02).

En estas pruebas, una simple viga de hormigón (sin refuerzo) se sujeta a flexión usando carga en dos puntos situados simétricamente hasta que ocurre la falla. Puesto que los puntos de carga están espaciados a un tercio del claro libre, la prueba es llamada prueba de carga en los tercios medios. El esfuerzo a tracción máximo teórico alcanzado en la fibra inferior de la viga de prueba es conocido como módulo de rotura.

Objetivos

Determinar la resistencia a la flexión del hormigón, por medio del uso de vigas simples de HCP, FT y HCP+FT cargadas en los tercios de la luz, así como el módulo de rotura indicado en MPa.

Producir esfuerzos tangenciales de corte en la interfase para demostrar la adherencia entre capas utilizando vigas de HCP+FT.

Aparatos

Máquina de ensayo. El método de carga en los tercios de la luz deberá utilizarse en la realización de ensayos de flexión, empleando bloques de carga, los cuales asegurarán que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y sin excentricidad. En la figura 4.50 se muestra un diagrama del aparato que cumple con este propósito.

La prensa utilizada en este ensayo pertenece a la marca ELE ADR 3000, aplicándose una velocidad de carga de 1,13 kN./seg. para vigas de hormigón de 150 x 150 x 500 mm.

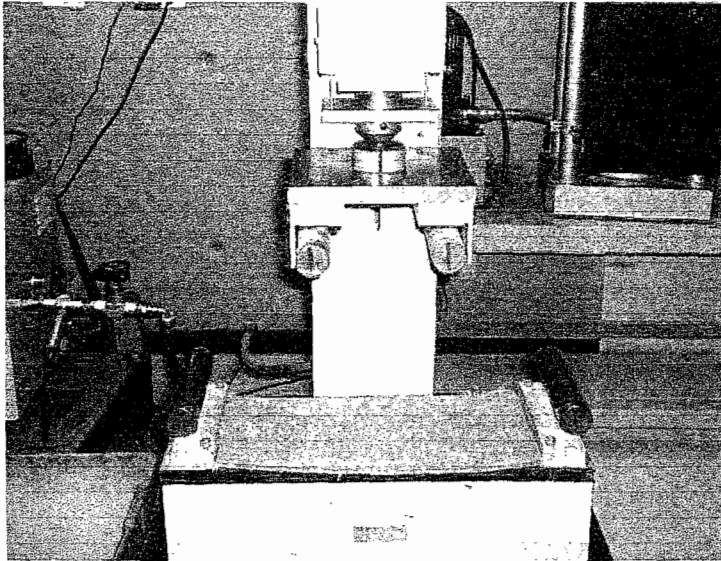


FIGURA 4.50 Equipo utilizado con prensa “ELE” 3000 KN.

Procedimiento.

En el caso de las vigas de HCP Y FT (individuales) gírese la muestra sobre un lado, con respecto a su posición de moldeo, en el caso de las vigas de HCP+FT (conjunto) la muestra debe colocarse en la posición de moldeo o de manera inversa a la posición de moldeo dependiendo de la capa a la que se desea aplicar el máximo esfuerzo de tracción, luego céntrese sobre los bloques de carga. Céntrese el sistema de carga en relación con la fuerza aplicada. Póngase los bloques de aplicación de

carga en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios, entre los soportes.

Aplíquese la carga en forma continua a una rata que incremente constantemente el esfuerzo de la fibra extrema, hasta que ocurra la rotura.

Regístrese la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo y calcúlese el módulo de rotura.

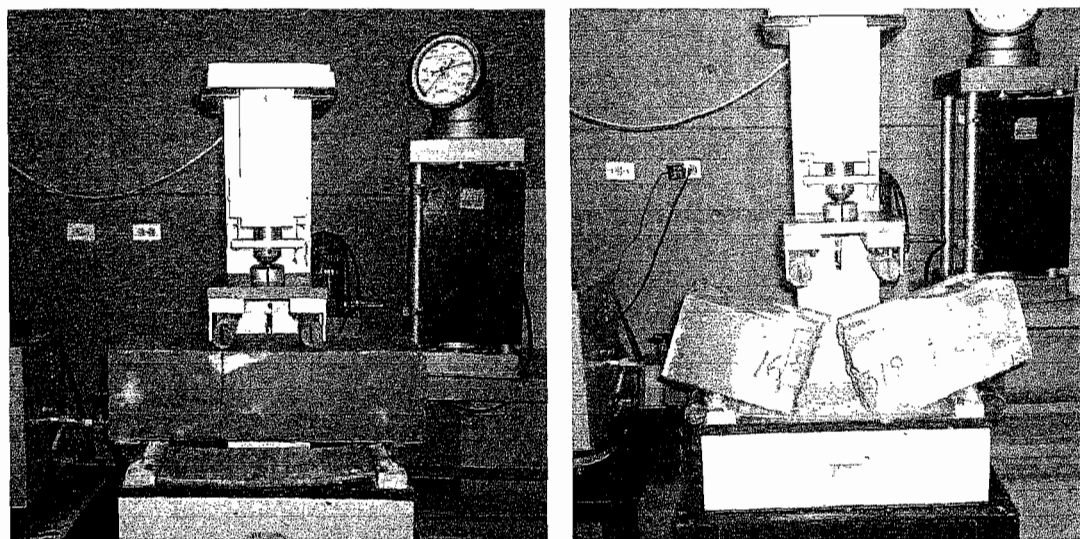


FIGURA 4.51 Procedimiento de rotura (ASTM C78-02) de vigas de HCP, FT y HCP+FT

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de la norma **ASTM C78-02**.



4.2.6.4 Ensayo de módulo de elasticidad (ASTM 469-02).

Siendo el hormigón un material usado en todo tipo de estructuras incluyendo pavimentos interesa conocer sus comportamientos elástico y plástico. La relación entre esfuerzos y deformaciones es de vital importancia.

La curva esfuerzo – deformación para hormigones se obtiene al aplicar cargas que generan esfuerzos, el ASTM C 469-02 considera como Módulo de Elasticidad (Estático) el que corresponde a un esfuerzo igual al 40% de la carga de rotura o carga última.

Aparatos.

Máquina de ensayo. Debe ser de similares características a las mencionadas en la sección 4.2.6.1.

La prensa utilizada en este ensayo pertenece a la marca ELE ADR 2000, aplicándose una velocidad de carga de 4,2 kN./seg. para cilindros de hormigón de 150 x 300 mm.

Dispositivo medidor de deformación. El deformímetro usado deberá estar situado en forma que su movimiento de deformación ocurra a lo largo del eje longitudinal del cilindro y deberá estar ajustado concéntricamente alrededor de la periferia del espécimen,

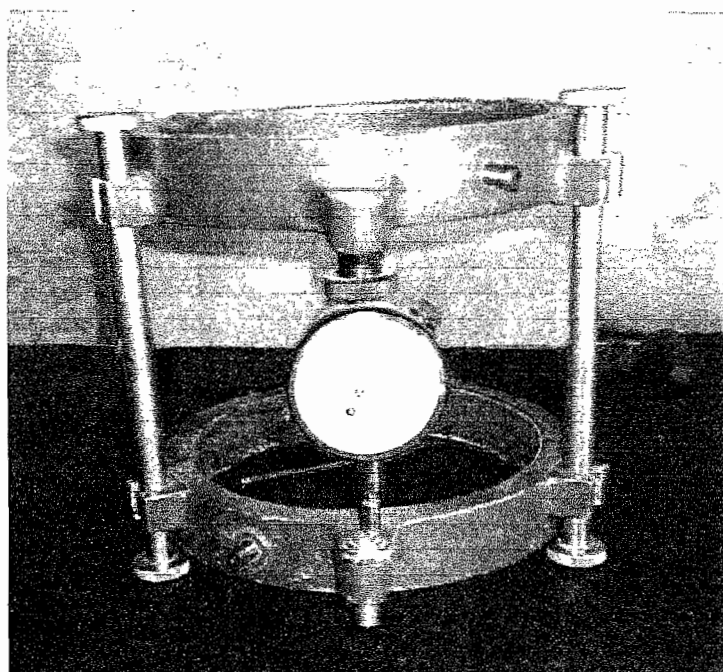


FIGURA 4.52 Deformímetro empleado para determinar el módulo de elasticidad

Procedimiento

Para determinar el módulo de elasticidad los especímenes requieren tener una edad de 28 días para ser ensayados.

Se deberá tener una pareja de especímenes, el primero deberá ser ensayado a compresión simple conforme a la sección 4.2.6.1 a la edad de 28 días para determinar la carga máxima, el segundo espécimen se deberá cargar con el 40% de la carga máxima determinada en el primer espécimen.

Antes de proceder a ensayar el segundo espécimen éste debe ser cargado tres veces con el 40% de la carga máxima determinada con la

finalidad de relajar el hormigón, una vez hecho esto se procede a cargar el hormigón hasta el 40% de la carga máxima repartida en intervalos iguales, registrando la respectiva deformación para cada uno de dichos intervalos.

Se determina el módulo de elasticidad y la curva esfuerzo – deformación.

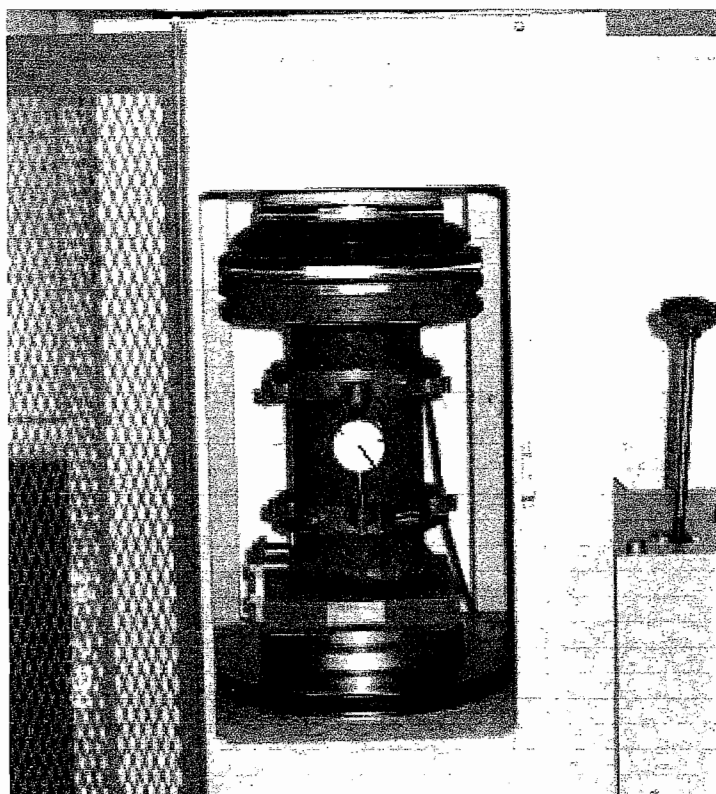


FIGURA 4.53 Procedimiento de ensayo (ASTM 469-02) de módulo de elasticidad en muestras de HCP y FT

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de la norma **ASTM C469-02**.



4.2.6.5 Ensayo de retracción por secado (ASTM C157/C157M-04).

La retracción, después del endurecimiento del hormigón, es el decrecimiento con el tiempo, del volumen del hormigón. El decrecimiento es debido a cambios en el contenido de humedad del hormigón y a cambios físicos-químicos, los cuales ocurren sin esfuerzos atribuibles a acciones externas al hormigón. Se denomina retracción por secado al efecto de cambio de volumen que experimenta el hormigón debido a su pérdida de agua cuando es conservado en aire no saturado.

Objetivos.

Determinar la retracción en el HCP y en el FT para cuantificar el diferencial que puede generar esfuerzos tangenciales en la interfase.

Aparatos.

Deformímetro o Comparador de Longitudes. Un tipo de instrumento que ha sido encontrado satisfactorio para usar con pequeños especímenes prismáticos es mostrado en la figura 4.54.

El deformímetro mostrado está equipado con un dial que permite obtener con facilidad lecturas para determinar el cambio de longitudes en especímenes, con una precisión de 0,002 mm. Además consta de una barra estándar de calibración que se deberá utilizar antes de cada lectura.

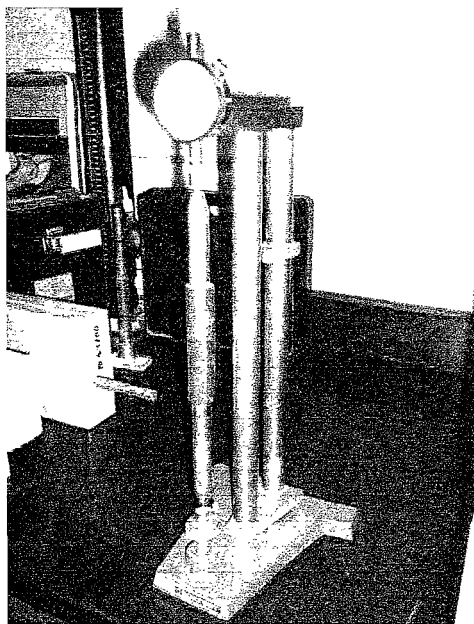


FIGURA 4.54 Deformímetro conveniente para medida de cambios de longitud

Procedimiento.

El siguiente procedimiento es válido tanto para las muestras de HCP como para las de FT, las cuales una vez de ser desmoldadas son llevadas a un cuarto de curado con una temperatura ambiente de 23° C. y 50% H.R. de igual manera el deformímetro debe estar sometido a las mismas condiciones de ambiente, luego deberá ser calibrado para tomar la primera lectura de las tres muestras patrones de cada tipo de hormigón.

Una vez registrada la primera lectura, las muestras son saturadas en agua con cal durante 30 minutos, al finalizar este tiempo de saturación se procede a retirar las muestras una a la vez para ser registrada la segunda lectura.

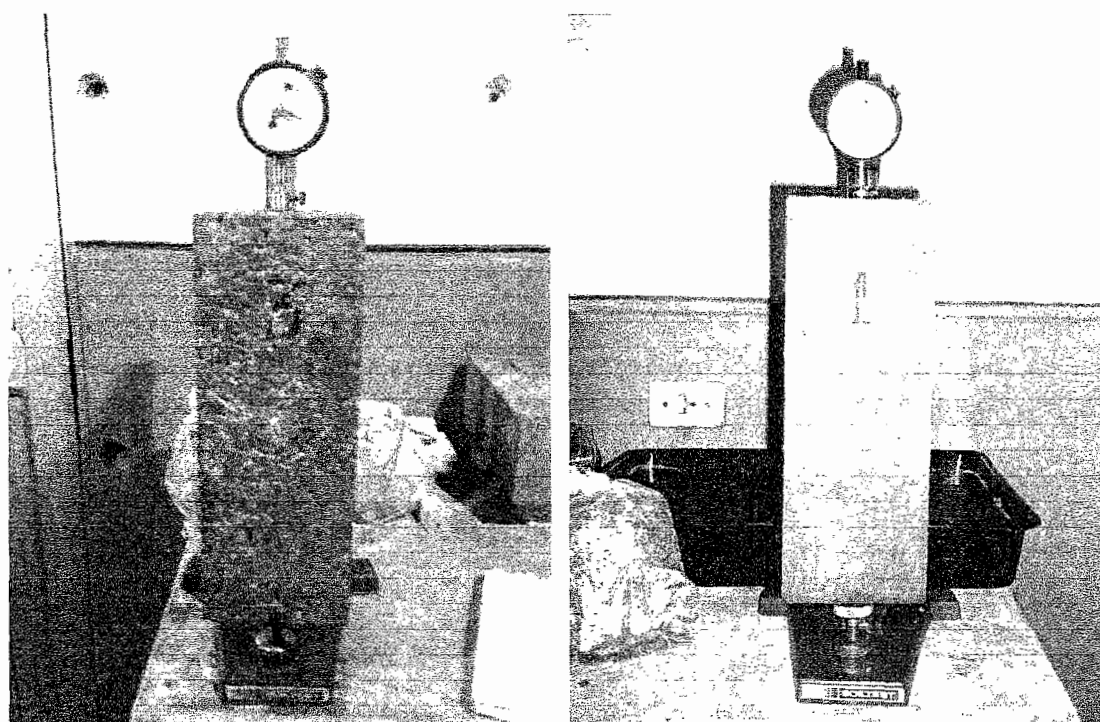


FIGURA 4.55 Procedimiento de Lecturas (ASTM C157) de muestras de HCP y FT

Las siguientes lecturas se realizarán cada 24 horas, para lo cual las muestras deben colocarse en un ambiente seco para que se produzca la pérdida del contenido de humedad del hormigón.



CIB-ESPOL

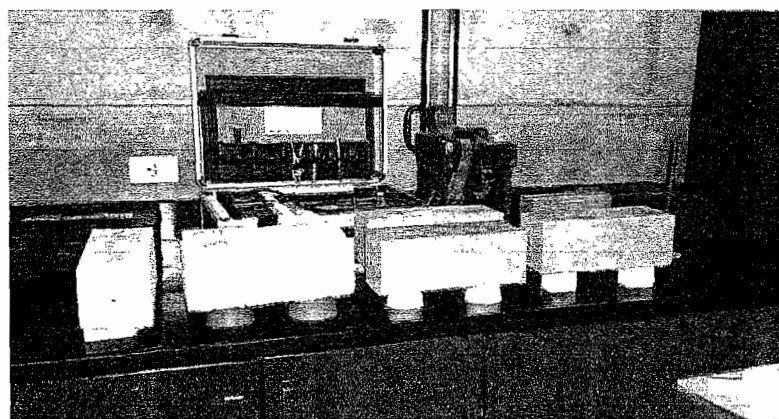


FIGURA 4.56 Almacenamiento de muestras en ambiente seco

Debe tomarse en cuenta que debe existir libre circulación de aire en todas las paredes de las muestras.

Es muy importante mantener constante la condición de ambiente seco durante el tiempo que dure el ensayo, lo cual puede lograrse con un sistema de aire acondicionado el cual evitará que las muestras vuelvan a hidratarse produciendo un hinchamiento en las muestras de hormigón.

Se recomienda codificar las muestras de tal forma que sea fácil identificar su posición al momento de colocarlas para tomar las lecturas, ya que todas las lecturas deben ser tomadas con la muestra colocada en la misma posición.

Regístrese las lecturas de cada una de las muestras hasta que se vuelvan constantes, es decir que no haya cambios entre una lectura y otra de la misma muestra durante al menos una semana.

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de las normas **ASTM C157 y ASTM C 490.**

4.2.6.6 Ensayo del martillo de rebote o esclerometría (ASTM C805-02).

Esta es una de las pruebas no destructivas más antiguas y aún es ampliamente utilizada. La prueba del martillo de rebote se basa en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie contra la cual golpea la masa.

Objetivos.

Localización de heterogeneidades, tales como vacíos o agujeros en muestras de HCP.

Evaluación de agrietamiento o fisuración del hormigón HCP.

Aparatos.

Martillo de rebote. El esclerómetro o martillo de rebote Schmidt es esencialmente un medidor de dureza de la superficie que proporciona un medio rápido y sencillo para verificar la uniformidad del concreto. Mide el rebote de un émbolo cargado con un resorte después de golpear una superficie de concreto. La lectura de número del rebote da una indicación de la resistencia y de la dureza del concreto.

El martillo utilizado para este ensayo pertenece a la casa PROCEQ y el modelo es DIGI SCHMIDT 2000 como se muestra en la figura 4.57

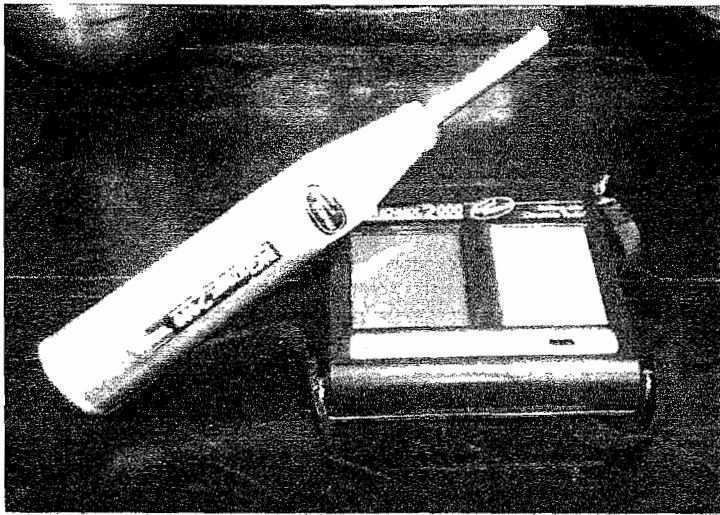


FIGURA 4.57 Martillo esclerométrico DIGI SCHMIDT 2000

Procedimiento.

Las muestras ensayadas de HCP pertenecen a la edad de 28 días. Los especímenes son anclados utilizando la prensa mostrada en la sección 4.2.6.1, utilizando una carga de aproximadamente 40kN.

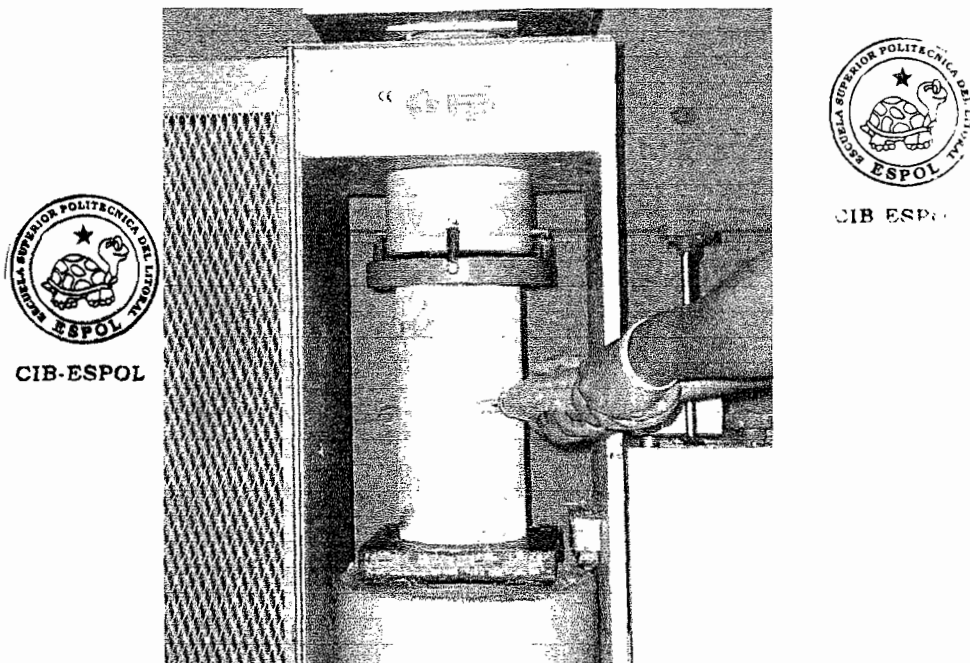


FIGURA 4.58 Procedimiento de ensayo de esclerometría (ASTM C805) en HCP

Sostenga el instrumento firmemente de manera que el émbolo este perpendicular a la superficie de prueba. Gradualmente empuje el instrumento hacia la superficie de la prueba hasta el impacto del martillo. Después del impacto mantenga la presión sobre el instrumento y si es necesario oprima el botón del martillo para dejar el émbolo en la posición asegurada.

Registre le número del rebote y tome diez lecturas de cada área de prueba.

Examine la impresión hecha en la superficie del impacto, y si el impacto produce rotura o resquebrajamiento descártese la lectura y tómese otra.

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de las normas **ASTM C805-02.**

4.2.6.7 Ensayo de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02).

Este es un método de prueba no destructiva establecido durante mucho tiempo, el cual determina la velocidad de las ondas longitudinales. Esta determinación se compone de la medición del tiempo tomado por un pulso, de ahí el nombre del método, para recorrer una distancia medida.

Objetivos.

Localización de heterogeneidades, tales como vacíos o agujeros en muestras de HCP y FT.

Medir la isotropía de la estructura HCP+FT.

Comprobar el monolitismo o la presencia de discontinuidades en la interfase HCP+FT.

Aparatos.

Aparato de velocidad de pulso. El aparato incluye transductores que se ponen en contacto con el concreto, un generador de pulsaciones con una frecuencia de entre 10 y 15 Hz., un amplificador, un circuito que mide el tiempo y una pantalla digital del tiempo tomado por la pulsación de ondas longitudinales para viajar entre los transductores.

El aparato de velocidad de pulso utilizado en este ensayo es de procedencia PROCEQ y modelo TICO.

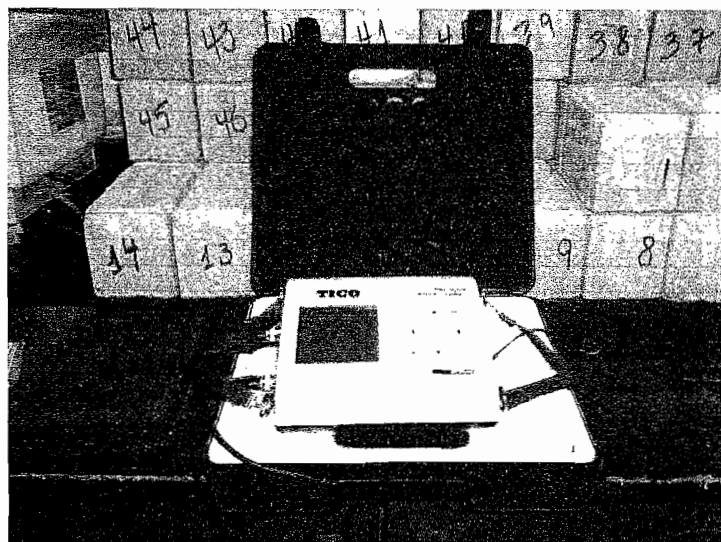


FIGURA 4.59 Aparato de velocidad de pulso TICO

Procedimiento.

Utilizar la barra de calibración para verificar el correcto funcionamiento del aparato.

Aplique un apropiado agente de acople como grasa en las caras de los transductores y/o en la superficie de prueba.



FIGURA 4.60 Aplicación de grasa en la superficie de HCP

Coloque los transductores directamente opuestos el uno contra el otro, presione firmemente las caras de los transductores contra la superficie de hormigón hasta obtener una lectura estable del tiempo de transmisión del pulso ultrasónico, velocidad del pulso y distancia entre los centros de las caras de los transductores.

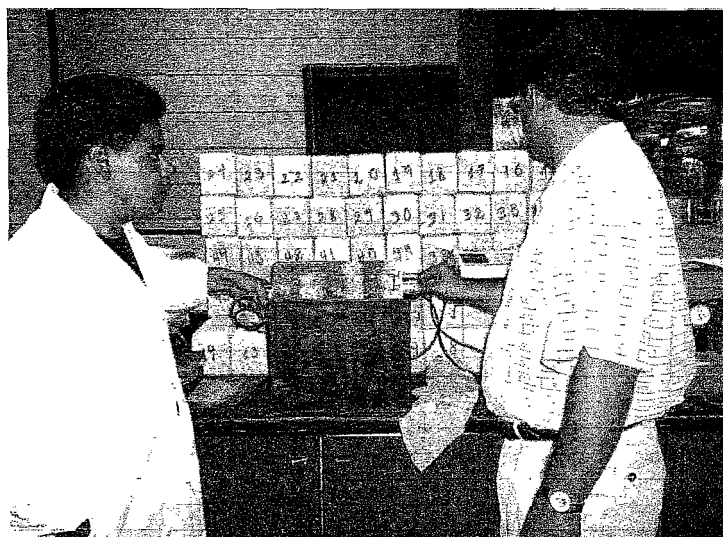


FIGURA 4.61 Aplicación del ensayo de velocidad de pulso (ASTM C597-02) en una muestra de HCP

Este ensayo ha sido realizado bajo recomendaciones de las normas **ASTM C597-02.**

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS.

A continuación se detallan los resultados obtenidos de los ensayos descritos en el capítulo anterior, en donde se incluyen tanto las curvas granulométricas como las curvas obtenidas de los ensayos proctor que sirven para determinar el diseño patrón del HCP y FT, posteriormente se adjuntan los resultados del desarrollo de las resistencias obtenidas por las muestras de HCP y FT de manera individual a distintas edades mediante ensayos destructivos y no destructivos. Finalmente son incluidos los resultados del crecimiento de resistencia de las muestras de HCP + FT en vigas sometidas a flexión y de núcleos calados en vigas, el análisis de estos resultados y sus respectivas conclusiones son incluidos en los capítulos posteriores.

5.1 Resultados de los ensayos de granulometría (ASTM C136-01).

5.1.1 Granulometría piedra caliza No. 7 - TM. 12 mm.

TABLA 5.1 Resultado de granulometría piedra caliza No.7

Tamiz		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
100 mm	4 in.	---	---	---	---
90 mm	3½ in.	---	---	---	---
75 mm	3 in.	---	---	---	---
63 mm	2½ in.	---	---	---	---
50 mm	2 in.	---	---	---	---
37.5 mm	1½ in.	---	---	---	---
25 mm	1 in.	---	---	---	---
19 mm	¾ in.	0,0	0	0	100
12.5 mm	½ in.	180	2	2	98
9.5 mm	3/8 in.	2155,0	27	29	71
4,75 mm	No. 4	4965,0	62	92	8
2,36 mm	No. 8	525,0	7	98	2
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		130,0	2	100	0
Módulo de finura :				6,2	

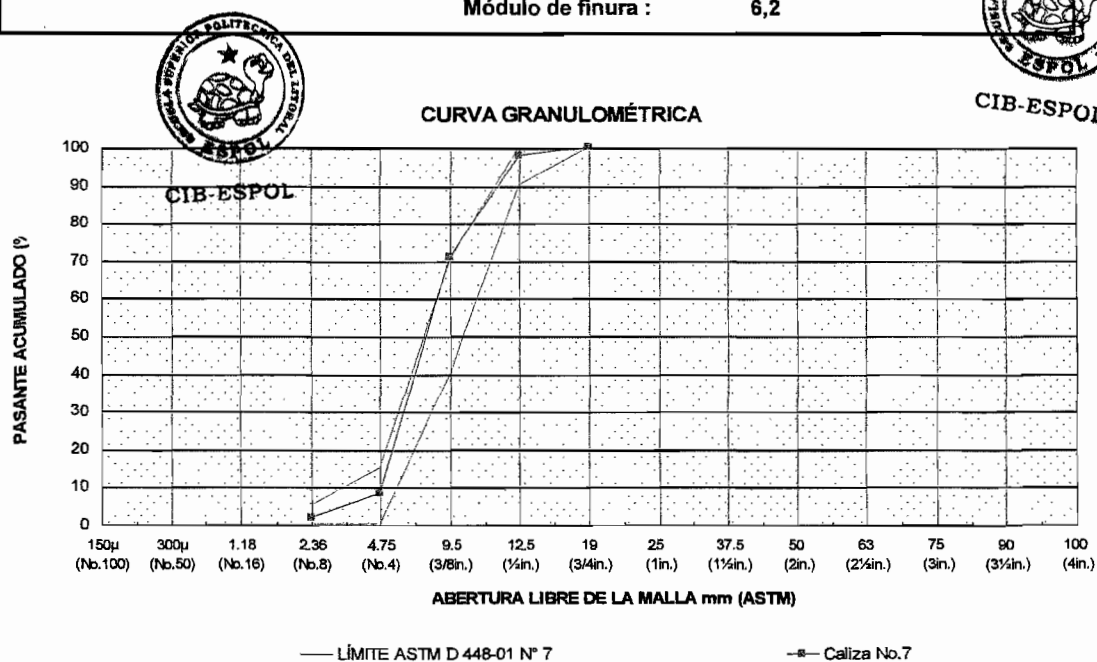


FIGURA 5.1 Curva granulométrica piedra caliza No. 7

5.1.2 Granulometría piedra caliza No. 67 - TM. 19 mm.

TABLA 5.2 Resultado de granulometría piedra caliza No.67

Tamiz		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
100 mm	4 in.	---	---	---	---
90 mm	3½ in.	---	---	---	---
75 mm	3 in.	---	---	---	---
63 mm	2½ in.	---	---	---	---
50 mm	2 in.	---	---	---	---
37.5 mm	1½ in.	---	---	---	---
25 mm	1 in.	0,0	0	0	100
19 mm	¾ in.	255,0	3	3	97
12.5 mm	½ in.	---	---	---	---
9.5 mm	3/8 in.	4680,0	59	62	38
4,75 mm	No. 4	2390,0	30	92	8
2,36 mm	No. 8	400,0	5	97	3
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		240,0	3	100	0
Módulo de finura :				6,5	

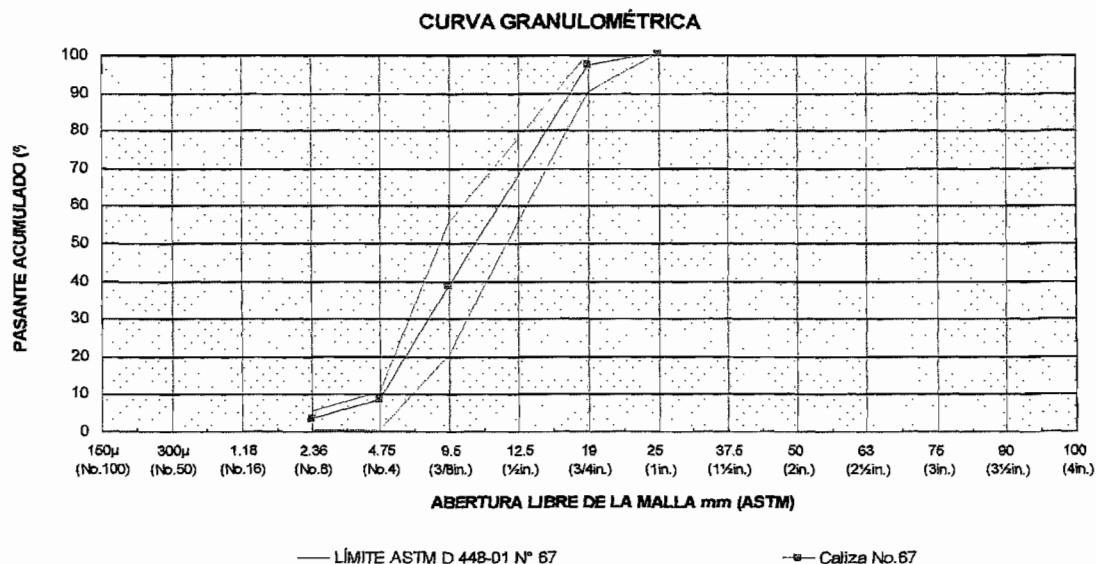


FIGURA 5.2 Curva granulométrica piedra caliza No.67

5.1.3 Granulometría arena de trituración homogenizada.

TABLA 5.3 Resultado de granulometría de arena de trituración

TAMIZ		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
9.5mm	3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0
4.8mm	No. 4	60,5	8,7	8,7	91,3
2.4mm	No. 8	242,0	34,7	43,3	56,7
1.2mm	No. 16	162,5	23,3	66,6	33,4
600um	No. 30	99,5	14,3	80,9	19,1
300um	No. 50	64,0	9,2	90,0	10,0
150um	No. 100	41,5	5,9	96,0	4,0
BANDEJA		28,0	4,0	100,0	0,0
Módulo de finura:				3,9	

CURVA GRANULOMÉTRICA

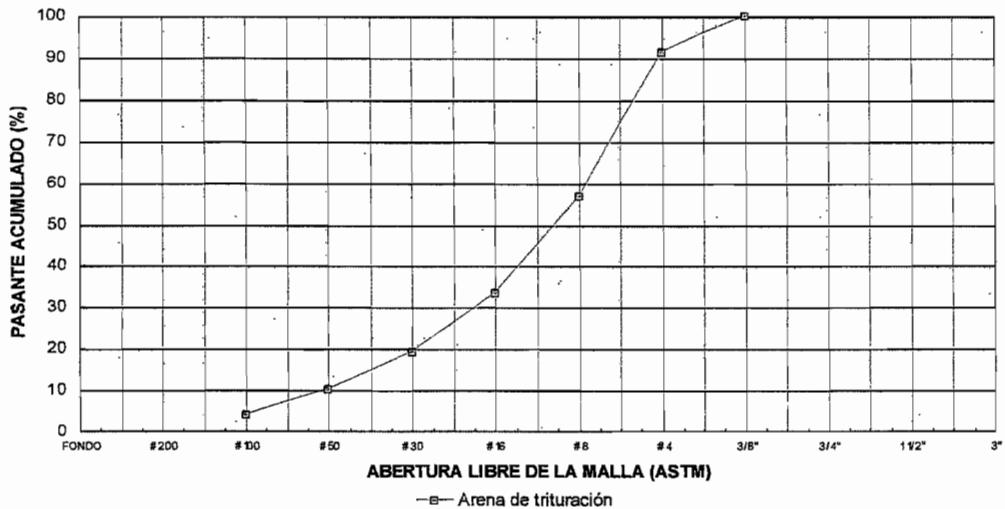


FIGURA 5.3 Curva granulométrica de arena de trituración

5.1.4 Granulometría arena natural de río.

TABLA 5.4 Resultado de granulometría de arena natural de río

TAMIZ		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
9.5mm	3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0
4.8mm	No. 4	21,5	3,7	3,7	96,3
2.4mm	No. 8	32,0	5,6	9,3	90,7
1.2mm	No. 16	52,0	9,0	18,3	81,7
600um	No. 30	102,5	17,8	36,1	63,9
300um	No. 50	238,5	41,4	77,5	22,5
150um	No. 100	116,0	20,1	97,7	2,3
BANDEJA		13,5	2,3	100,0	0,0
Módulo de finura:				2,4	



CURVA GRANULOMÉTRICA

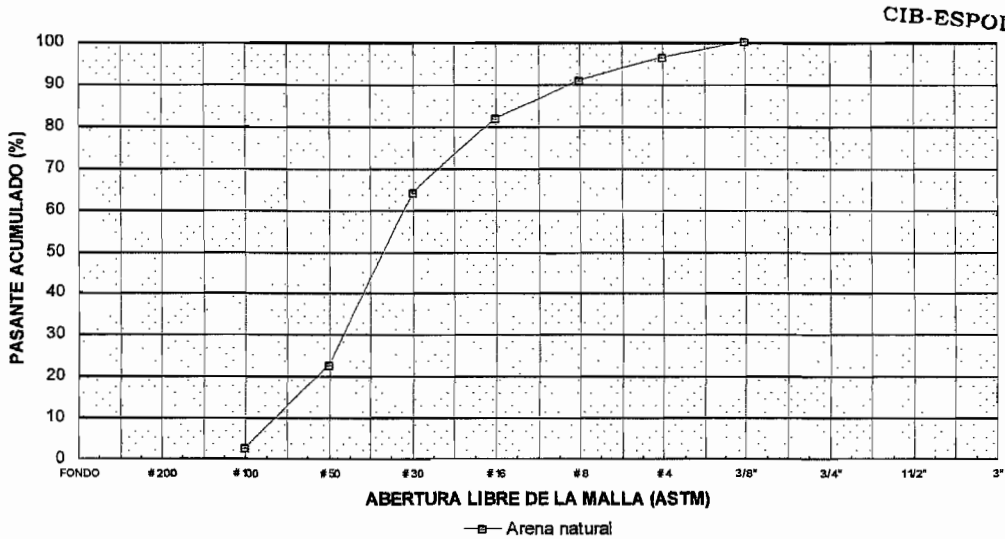


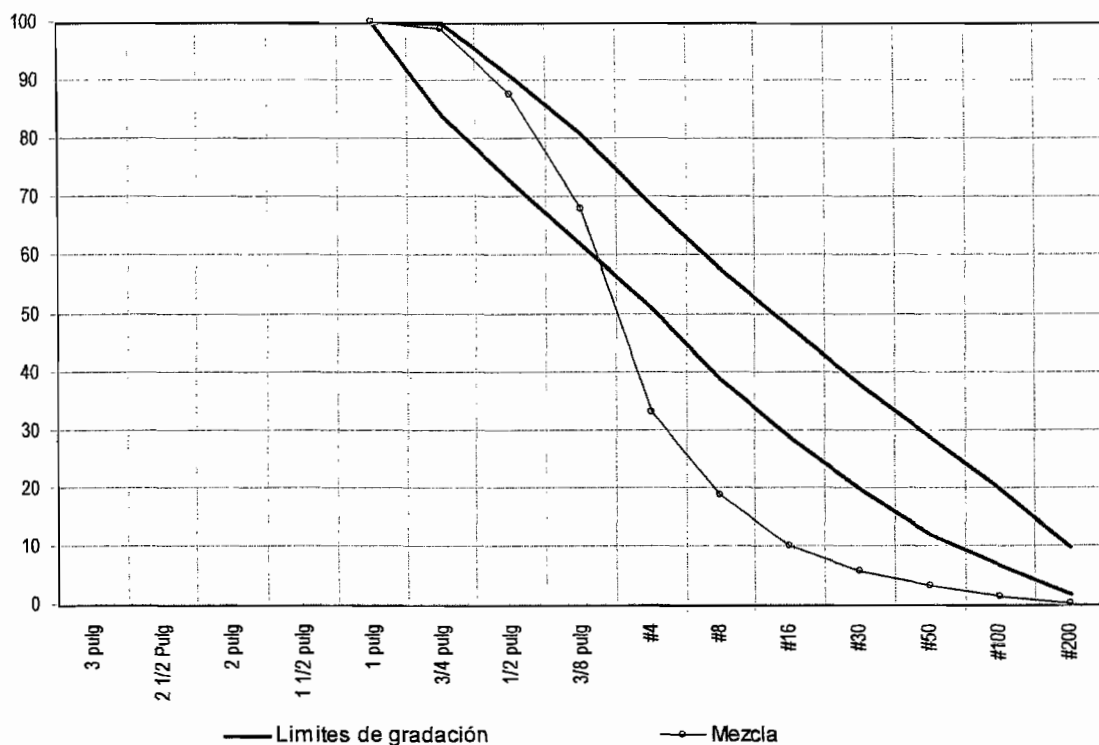
FIGURA 5.4 Curva granulométrica de arena de natural de río

5.2 Resultados de los ensayos proctor (ASTM D1557).

5.2.1 Resultados del ensayo proctor utilizando 30% de arena de trituración.

TABLA 5.5 Dosificación – 30% arena de trituración

Dosificación	Kg/m ³	Contenido de agregados
Cemento IP (HE):	250	
Piedra No. 7	693	35,0%
Piedra No. 67	693	35,0%
Arena triturada:	594	30,0%
Polyheed RI	1% del contenido de cemento	



**FIGURA 5.5 Combinación Granulométrica ACI 325.10R
utilizando 30% arena de trituración**

TABLA 5.6 Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 30% de arena de trituración

Cálculo de Humedad								
RECIPIENTE No.		1	2	3	4	5	6	7
PESO T + H + W	(g)	804,0	732,5	1381,0	1315,0	1355,0	1529,5	1352,0
PESO T + H + W	(g)	774,0	705,0	1336,5	1263,0	1303,0	1470,0	1295,5
PESO W	(g)	30,0	27,5	44,5	52,0	52,0	59,5	56,5
PESO T	(g)	233,5	187,5	565,0	560,5	603,5	659,5	573,0
PESO S	(g)	540,5	517,5	771,5	702,5	699,5	810,5	722,5
% W	(%)	5,6	5,3	5,8	7,40	7,43	7,3	7,8
Cálculo de Densidad								
PESO M + H + W	(g)	11160	11325	11500	11630	11750	11615	11645
PESO M	(g)	6440	6440	6440	6440	6440	6440	6440
PESO S + W	(g)	4720	4885	5060	5190	5310	5175	5205
VOLUMEN M	(cm ³)	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202
PESO SECO	(g)	4472	4639	4784	4832	4943	4821	4827
DENSIDAD HUMEDA	(kg/m ³)	2144	2218	2298	2357	2411	2350	2364
DENSIDAD SECA	(kg/m ³)	2031	2106	2173	2195	2245	2189	2192
Simbología: T: tara, H: hormigón, W: agua, %W: % de humedad, M: molde								

Densidad seca máxima: 2210 Kg/m³
Humedad óptima: 7,3%

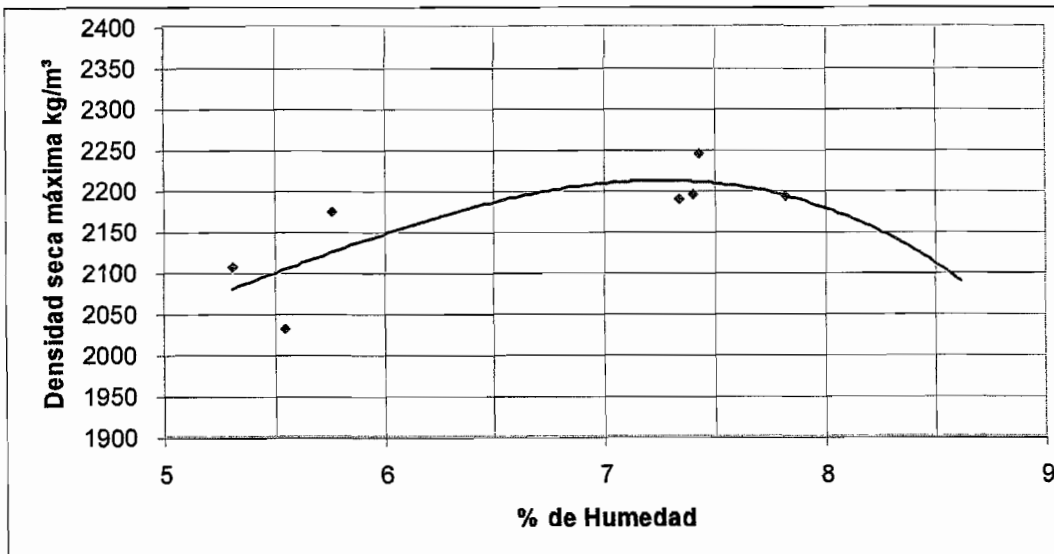


FIGURA 5.6 Curva densidad máx. vs. % humedad con 30% de arena de trituración

5.2.2 Resultados del ensayo proctor utilizando 35% de arena de trituración.

TABLA 5.7 Dosificación – 35% arena de trituración

Dosificación	kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento:	250	
Piedra No. 7:	644	32,5%
Piedra No. 67 mm:	644	32,5%
Arena triturada:	693	35,0%
Polyheed RI:	1% del contenido del cemento en peso	

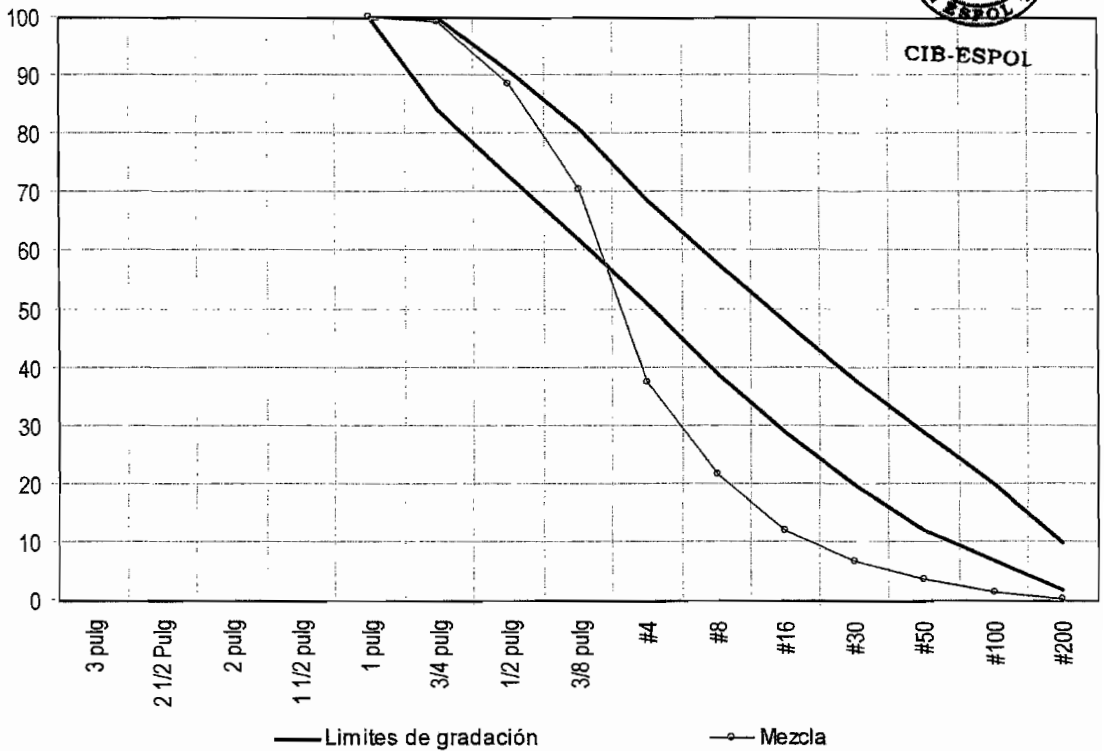


FIGURA 5.7 Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 35% arena de trituración

TABLA 5.8 Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 35% de arena de trituración

Cálculo de Humedad								
RECIPIENTE No.		1	2	3	4	5	6	7
PESO T + S + W	(g)	971,5	881,0	1520,0	1496,5	1797,5	1682,5	1743,0
PESO T + S	(g)	940,0	845,5	1469,0	1440,0	1716,5	1607,0	1655,0
PESO W	(g)	31,5	35,5	51,0	56,5	81,0	75,5	88,0
PESO T	(g)	233,5	188,5	564,0	560,0	603,0	658,5	572,5
PESO S	(g)	706,5	657,0	905,0	880,0	1113,5	948,5	1082,5
% W	(%)	4,5	5,4	5,6	6,42	7,27	8,0	8,1
Cálculo de Densidad								
PESO M + S + W	(g)	11220	11235	11435	11540	11665	11605	11600
PESO M	(g)	6440	6440	6440	6440	6440	6440	6440
PESO S + W	(g)	4780	4795	4995	5100	5225	5165	5160
VOLUMEN M	(cm ³)	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202
PESO SECO	(g)	4576	4549	4729	4792	4871	4784	4772
DENSIDAD HUMEDA	(kg/m ³)	2171	2178	2268	2316	2373	2346	2343
DENSIDAD SECA	(kg/m ³)	2078	2066	2147	2176	2212	2173	2167
Simbología: T: tara, H: hormigón, W: agua, %W: % de humedad, M: molde								

Densidad seca máxima: 2215 Kg/m³
Humedad óptima: 7%

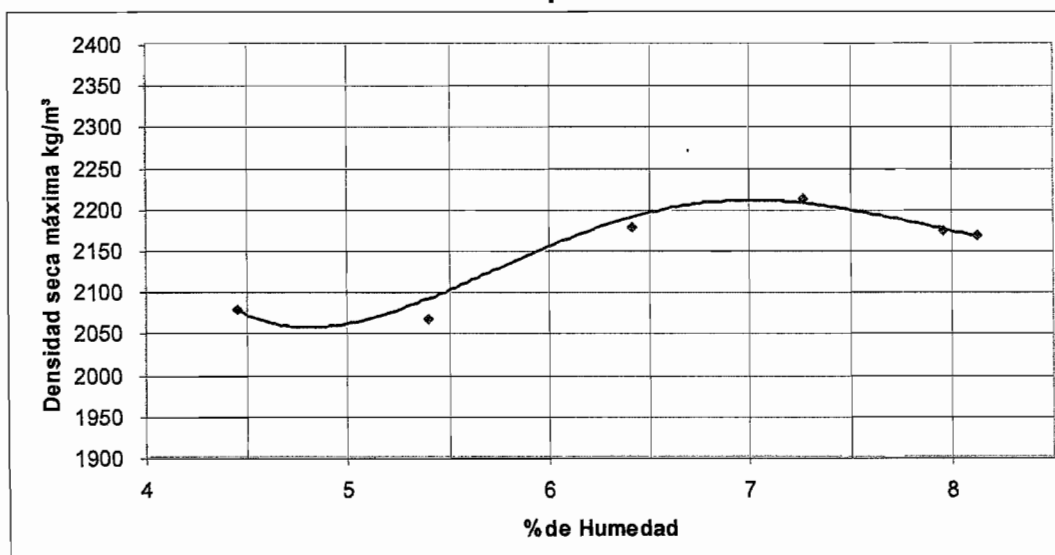
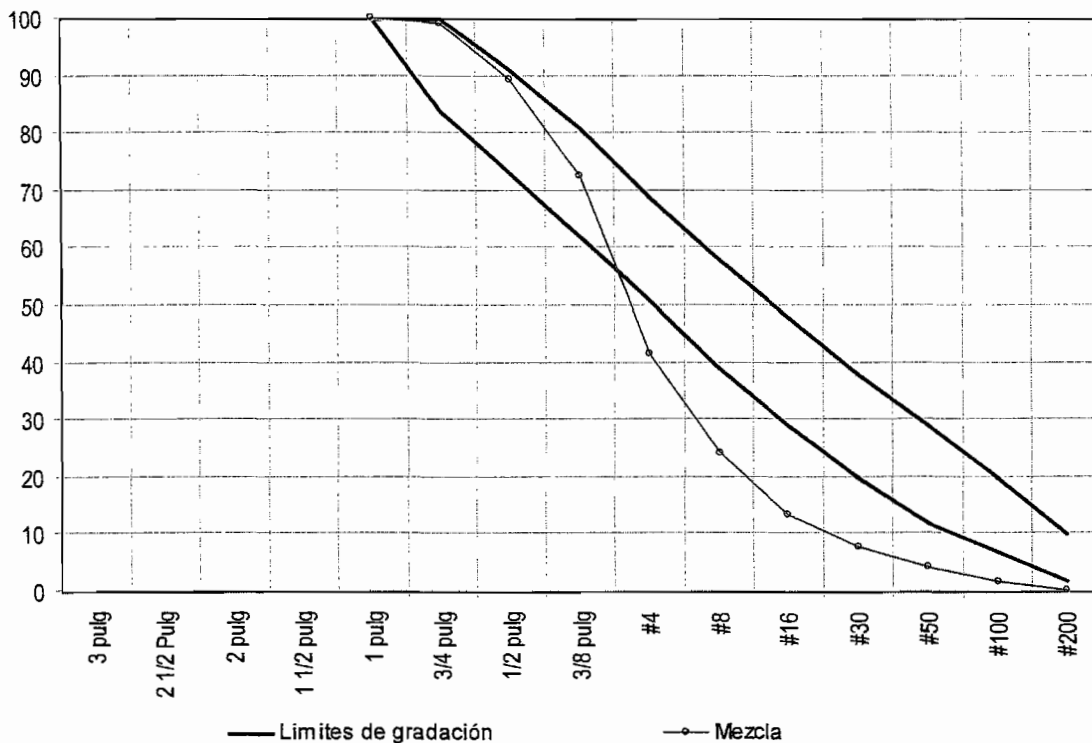


FIGURA 5.8 Curva densidad máx. vs. % humedad con 35% de arena de trituración

5.2.3 Resultados del ensayo proctor utilizando 40% de arena de trituración.

TABLA 5.9 Dosificación – 40% arena de trituración

Dosificación	kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento IP (HE):	250	
Piedra No. 7:	594	30,0%
Piedra No. 67:	594	30,0%
Arena triturada:	792	40,0%
Polyheed RI	1% del contenido de cemento	



**FIGURA 5.9 Combinación Granulométrica ACI 325.10R
utilizando 40% arena de trituración**

TABLA 5.10 Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 40% de arena de trituración

Cálculo de Humedad								
RECIPIENTE No.		1	2	3	4	5	6	7
PESO T + S + W	(g)	759,5	981,0	1536,0	1657,0	1593,5	1571,5	1599,5
PESO T + S	(g)	735,5	942,0	1471,0	1596,5	1541,0	1507,0	1520,5
PESO W	(g)	24,0	39,0	65,0	60,5	52,5	64,5	79,0
PESO T	(g)	233,5	188,0	560,5	603,5	658,5	572,5	558,0
PESO S	(g)	502,0	754,0	910,5	993,0	882,5	934,5	962,5
% W	(%)	4,8	5,2	7,1	6,09	5,95	6,9	8,2
Cálculo de Densidad								
PESO M + S + W	(g)	11095	11320	11680	11595	11660	11685	11560
PESO M	(g)	6455	6455	6455	6455	6455	6455	6455
PESO S + W	(g)	4640	4865	5225	5140	5205	5230	5105
VOLUMEN M	(cm ³)	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202
PESO SECO	(g)	4428	4626	4877	4845	4913	4892	4718
DENSIDAD HUMEDA	(kg/m ³)	2107	2209	2373	2334	2364	2375	2318
DENSIDAD SECA	(kg/m ³)	2011	2101	2215	2200	2231	2222	2142
Simbología: T: tara, H: hormigón, W: agua, %W: % de humedad, M: molde								

Densidad seca máxima: 2230 Kg/m³
Humedad óptima: 6,5%



CIB-ESPOL

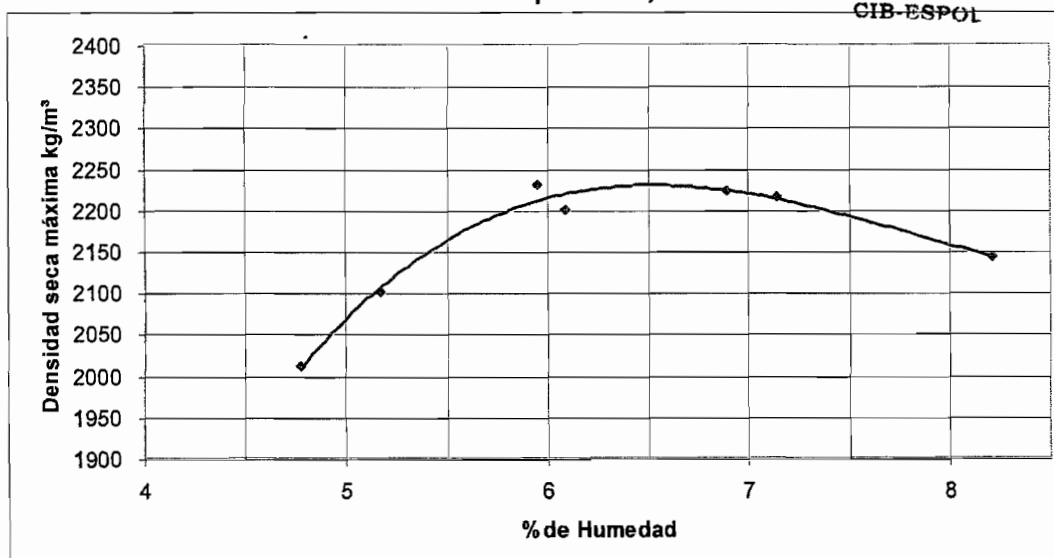


FIGURA 5.10 Curva densidad máx. vs. % humedad con 40% de arena de trituración

5.2.4 Resultados del ensayo proctor utilizando 50% de arena de trituración.

TABLA 5.11 Dosificación – 50% arena de trituración

Dosificación	kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento:	250	
Piedra No. 7:	495	25,0%
Piedra No. 67:	495	25,0%
Arena triturada:	990	50,0%
Polyheed RI	1% del contenido de cemento	

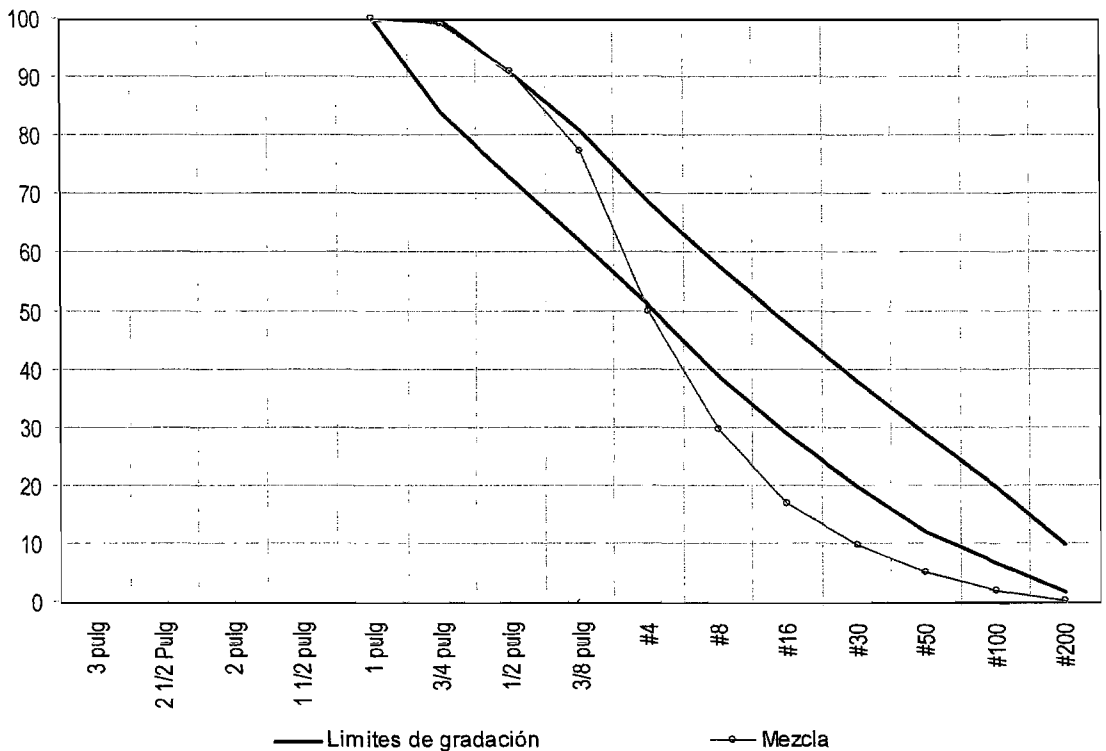


FIGURA 5.11 Combinación Granulométrica ACI 325.10R utilizando 50% arena de trituración

TABLA 5.12 Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 50% de arena de trituración

Cálculo de Humedad								
RECIPIENTE No.		1	2	3	4	5	6	7
PESO T + S + W	(g)	779,5	819,0	1611,0	1456,0	1673,5	1413,5	1510,0
PESO T + S	(g)	755,5	786,5	1553,5	1404,5	1604,0	1360,0	1441,0
PESO W	(g)	24,0	32,5	57,5	51,5	69,5	53,5	69,0
PESO T	(g)	233,5	188,5	564,5	560,5	603,0	658,5	572,5
PESO S	(g)	522,0	598,0	989,0	844,0	1001,0	701,5	868,5
% W	(%)	4,6	5,4	5,8	6,10	6,94	7,6	7,9
Cálculo de Densidad								
PESO M + S + W	(g)	11110	11150	11305	11420	11495	11465	11510
PESO M	(g)	6485	6485	6485	6485	6485	6485	6485
PESO S + W	(g)	4625	4665	4820	4935	5010	4980	5025
VOLUMEN M	(cm ³)	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202
PESO SECO	(g)	4422	4425	4555	4651	4685	4627	4655
DENSIDAD HUMEDA	(kg/m ³)	2100	2119	2189	2241	2275	2262	2282
DENSIDAD SECA	(kg/m ³)	2008	2009	2069	2112	2127	2101	2114
Simbología: T: tara, H: hormigón, W: agua, %W: % de humedad, M: molde								



Densidad seca máxima: 2140 Kg/m³
Humedad óptima: 7,2%

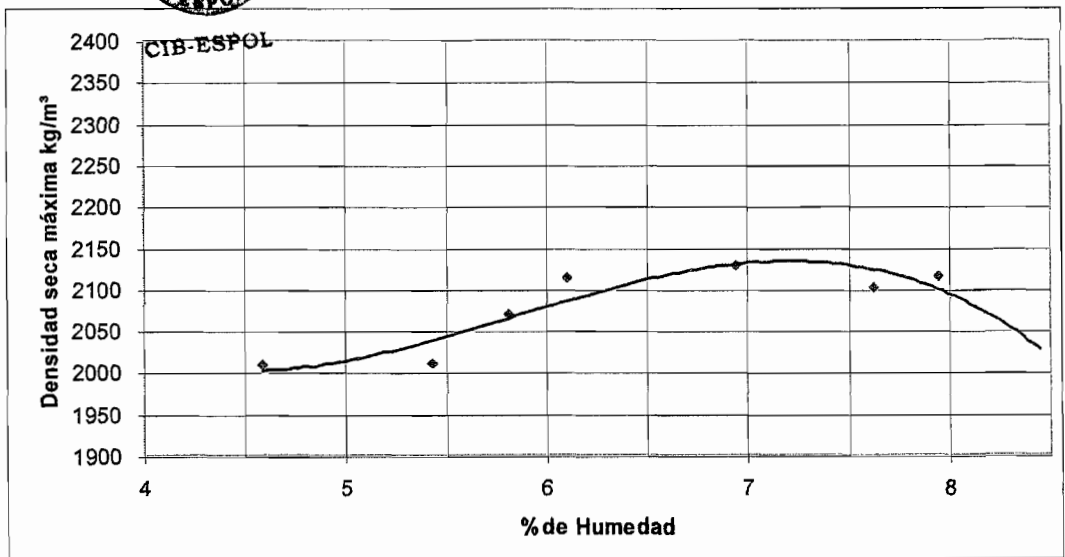
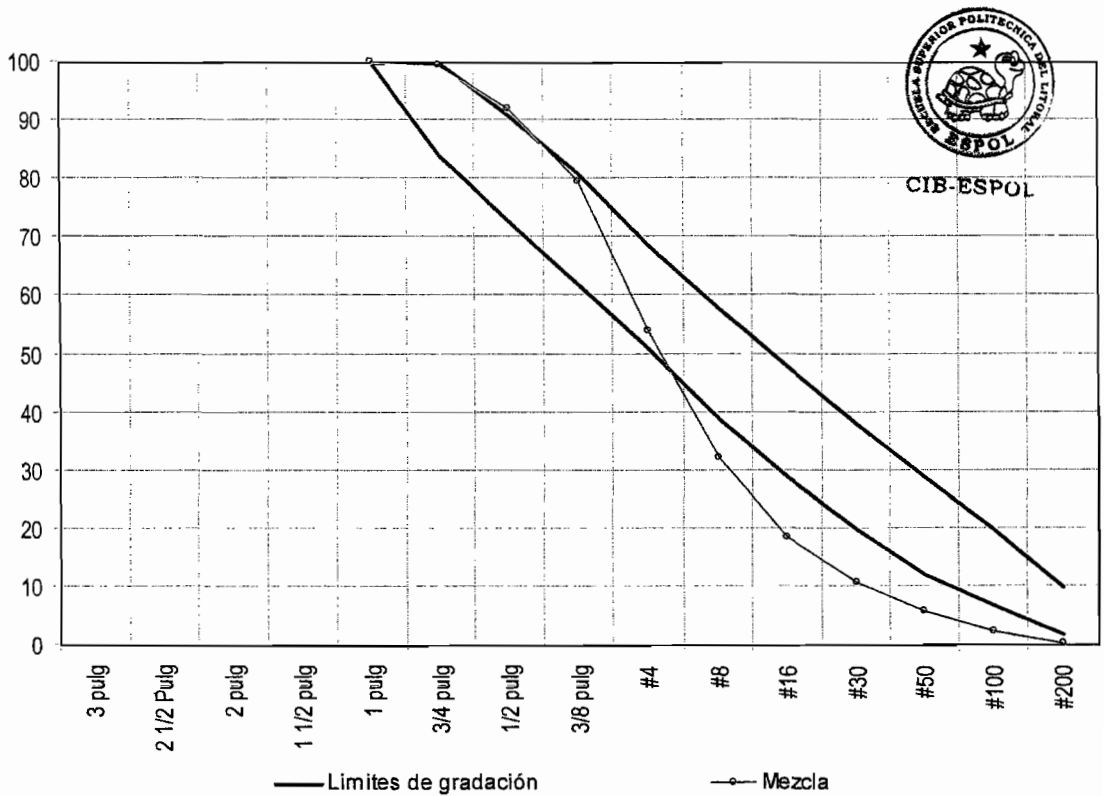


FIGURA 5.12 Curva densidad máx. vs. % humedad con 50% de arena de trituración

5.2.5 Resultados del ensayo proctor utilizando 55% de arena de trituración.

TABLA 5.13 Dosificación – 55% arena de trituración

Dosificación	kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento:	250	
Piedra No. 7:	445,5	22,5%
Piedra No. 67:	445,5	22,5%
Arena triturada:	1089	55,0%
Polyheed RI	1% del contenido de cemento	



**FIGURA 5.13 Combinación Granulométrica ACI 325.10R
utilizando 55% arena de trituración**

TABLA 5.14 Resultados de compactación proctor modificado ASTM D1557 con 55% de arena de trituración

Cálculo de Humedad								
RECIPIENTE No.		1	2	3	4	5	6	7
PESO T + S + W	(g)	1659,5	1629,0	1499,0	1779,0	1126,0	1362,5	1358,5
PESO T + S	(g)	1598,0	1560,0	1442,5	1691,0	1096,5	1302,5	1291,0
PESO W	(g)	61,5	69,0	56,5	88,0	29,5	60,0	67,5
PESO T	(g)	565,0	603,5	573,0	558,5	572,0	555,5	562,5
PESO S	(g)	1033,0	956,5	869,5	1132,5	524,5	747,0	728,5
% W	(%)	5,95	7,21	6,5	7,8	5,6	8,0	9,3
Cálculo de Densidad								
PESO M + S + W	(g)	11480	11645	11480	11495	11455	11600	11495
PESO M	(g)	6480	6480	6480	6480	6480	6480	6480
PESO S + W	(g)	5000	5165	5000	5015	4975	5120	5015
VOLUMEN M	(cm ³)	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202
PESO SECO	(g)	4719	4817	4695	4653	4710	4739	4590
DENSIDAD HUMEDA	(kg/m ³)	2271	2346	2271	2277	2259	2325	2277
DENSIDAD SECA	(kg/m ³)	2143	2188	2132	2113	2139	2152	2084
Simbología: T: tara, H: hormigón, W: agua, %W: % de humedad, M: molde								

Densidad seca máxima: 2150 Kg/m³
Humedad óptima: 7,2%

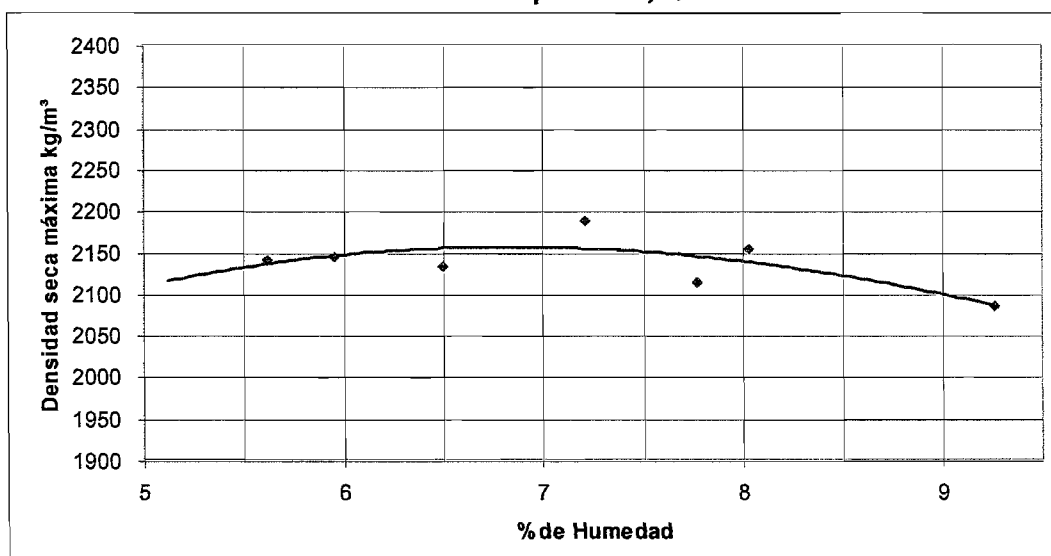


FIGURA 5.14 Curva densidad máx. vs. % humedad con 55% de arena de trituración

5.3 Resultados de los ensayos de caracterización del HCP.

5.3.1 Resultados del ensayo de compresión simple (ASTM C39-03)

en muestras de HCP a distantes edades.

TABLA 5.15 Resultados de compresión simple en HCP – 3 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16316-1	149	300	12,01	258,60	14,83
16316-2	148	300	12,01	285,90	17,20
Promedio					16,02

TABLA 5.16 Resultados de compresión simple en HCP – 7 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16316-3	150	295	11,97	318,90	18,04
16316-4	150	299	12,11	367,40	20,79
Promedio					19,42

TABLA 5.17 Resultados de compresión simple en HCP – 28 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16316-5	150	298	12,24	418,80	23,70
16316-6	149	300	12,44	397,63	22,80
Promedio					23,25

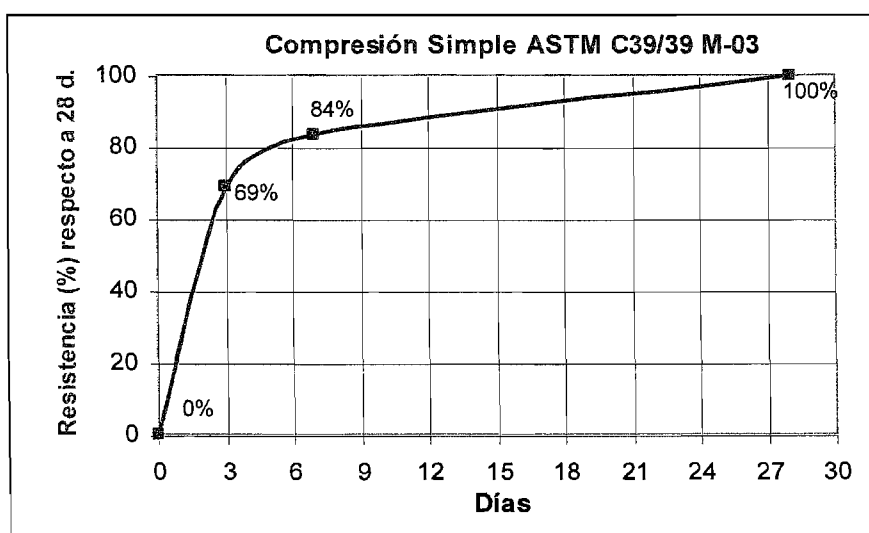


FIGURA 5.15 Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP

5.3.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en muestras de HCP a distantes edades.

TABLA 5.18 Resultados de T.C.D. en HCP – 3 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16317-1	150	302	11,96	124,30	1,74
16317-2	149	300	11,95	119,50	1,70
Promedio					1,72

TABLA 5.19 Resultados de T.C.D. en HCP – 7 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16317-3	151	299	12,49	159,60	2,25
16317-4	150	298	12,27	153,20	2,18
Promedio					2,22

TABLA 5.20 Resultados de T.C.D. en HCP – 28 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16317-5	151	299	12,86	213,30	3,01
16317-6	151	298	12,49	226,00	3,20
Promedio					3,10

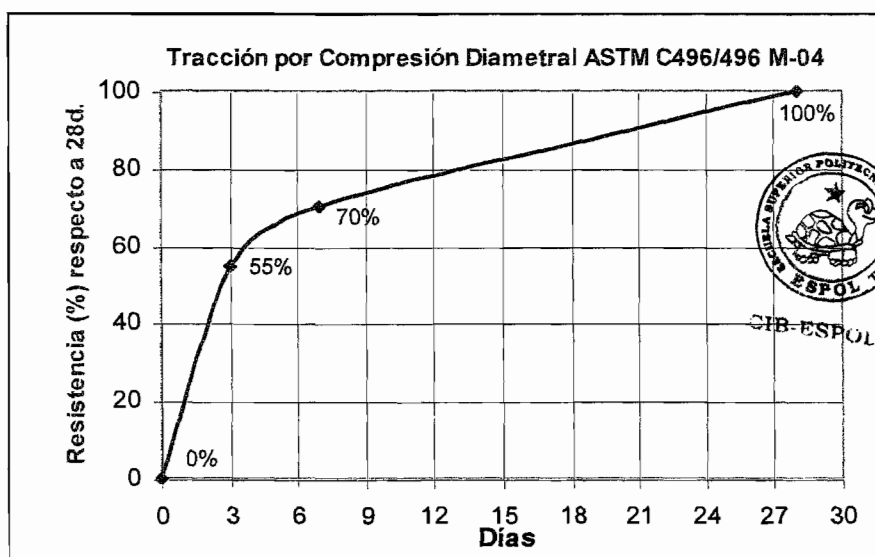


FIGURA 5.16 Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP

5.3.3 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de HCP.

TABLA 5.21 Resultados del ensayo a flexión en HCP – 28 días

Muestra No.	Ancho mm.	Altura mm.	Luz libre mm.	Carga de Rotura kN.	Mod. Rot. MPa.
16318-1	150	155	450	38,30	4,78
16318-2	158	155	450	36,16	4,29
				Promedio	4,53

5.3.4 Resultados del ensayo módulo de elasticidad. (ASTM C 469-02) del HCP.

TABLA 5.22 Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad

Muestra:	16316-5
Edad:	28 días
Condición:	Muestra (húmeda)
Diámetro:	150 mm.
Longitud:	300 mm.
Resistencia máx.:	24,00 MPa.
Área:	17671 mm. ²
40% carga	170,0 kN.
40% resisten	9,6 MPa.

TABLA 5.23 Resultados del ensayo módulo de elasticidad del HCP

Lect. 1	Lect. 2	Prom. Lectura Deformímetro LC-2M	Carga kN.	Promedio Deformación mm.
1,50	1,50	1,50	25,35	1,50E-02
3,50	3,60	3,55	56	3,55E-02
7,00	7,00	7,00	112	7,00E-02
12,90	12,80	12,85	170	1,29E-01

TABLA 5.24 Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo-deformación

Esfuerzo MPa	Deformación Unitaria
1,4	0,00005
3,2	0,00012
6,3	0,00023
9,6	0,00043
E= 21,6 GPa.	

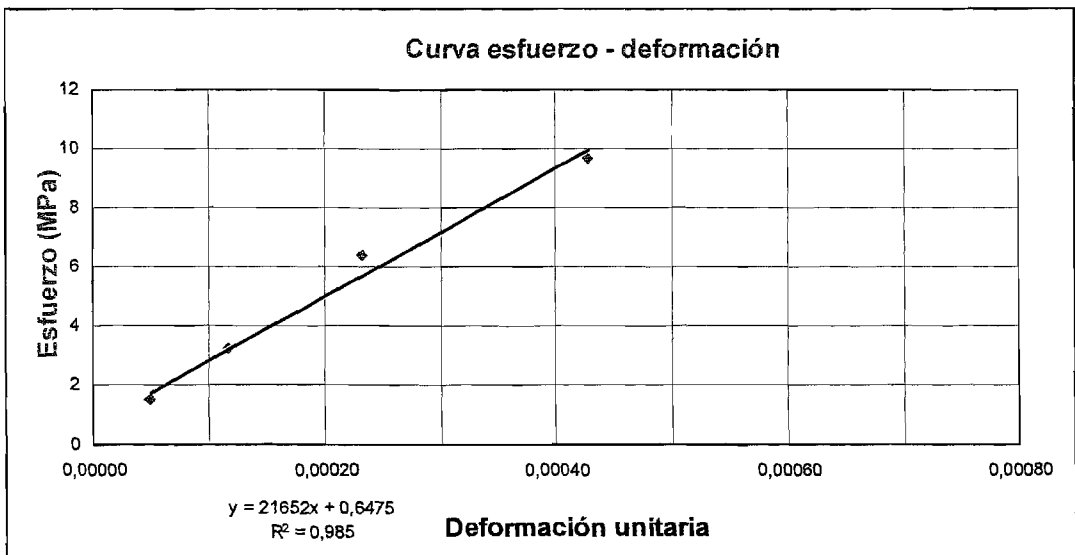


FIGURA 5.17 Curva esfuerzo – deformación para el HCP

TABLA 5.25 Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad

Muestra:	16316-6
Edad:	28 días
Condición:	Muestra (húmeda)
Diámetro:	150 mm.
Longitud:	300 mm.
Resistencia máx.:	24,00 MPa.
Área:	17671 mm. ²
40% carga:	170 kN.
40% resistencia:	9,6 MPa.

TABLA 5.26 Resultados del ensayo módulo de elasticidad del HCP

Lect. 1	Lect. 2	Prom. Lectura Deformímetro LC-2M	Carga kN.	Promedio Deformación mm.
1,50	1,50	1,50	26,35	1,50E-02
3,80	3,80	3,80	56	3,80E-02
7,90	8,00	7,95	112	7,95E-02
12,70	12,80	12,75	170	1,28E-01

TABLA 5.27 Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo-deformación

Esfuerzo MPa	Deformación Unitaria
1,5	0,00005
3,2	0,00013
6,3	0,00027
9,6	0,00043

E= 21,7 GPa.

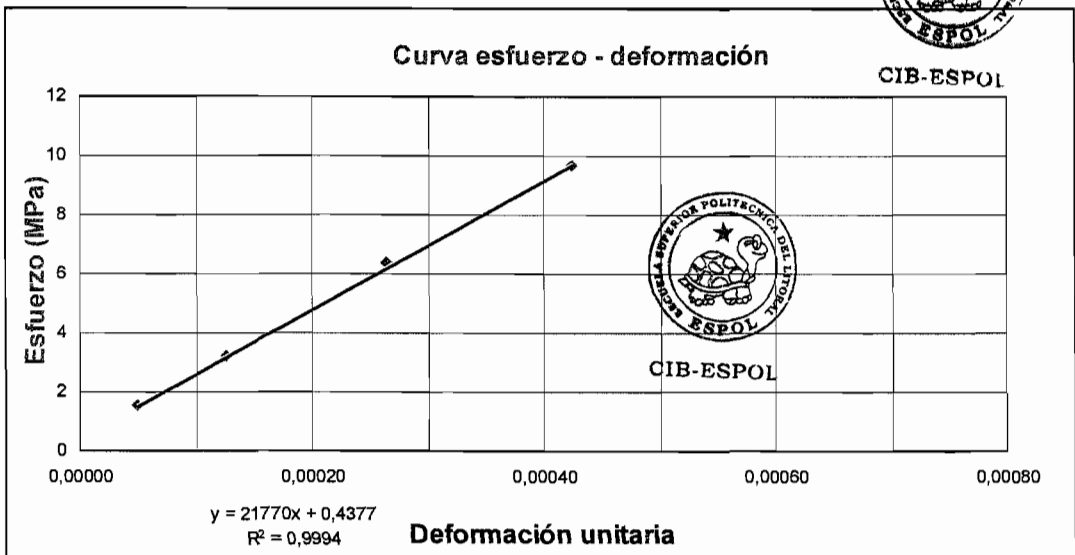


FIGURA 5.18 Curva esfuerzo – deformación para el HCP

Promediando los dos ensayos realizados el módulo de elasticidad para el HCP es **21,65 GPa.**

5.3.5 Resultados del ensayo de retracción por secado (ASTM C157-04) en muestras de HCP.

TABLA 5.28 Resultados ensayo de retracción por secado del HCP

Lectura 1	Lec. (mm)	Δ (%)	Lectura 2	Lec. (mm)	Δ (%)	Δ (%) Prom.
1,5 - 7,2	3,072	0,00000	0,7 - 5,0	1,450	0,0000	0,0000
1,5 - 7,4	3,074	0,00080	0,7 - 5,0	1,450	0,0000	0,0004
1,5 - 7,4	3,074	0,00080	0,7 - 5,0	1,450	0,0000	0,0004
1,5 - 7,4	3,074	0,00080	0,7 - 5,0	1,450	0,0000	0,0004
1,5 - 7,4	3,074	0,00080	0,7 - 4,6	1,446	-0,0016	-0,0004
1,5 - 3,2	3,032	-0,01600	0,7 - 0,4	1,404	-0,0184	-0,0172
1,5 - 2,2	3,022	-0,02000	0,6 - 19,8	1,398	-0,0208	-0,0204
1,5 - 1,4	3,014	-0,02320	0,6 - 19,0	1,390	-0,0240	-0,0236
1,5 - 0,8	3,008	-0,02560	0,6 - 18,8	1,388	-0,0248	-0,0252
1,4 - 19,8	2,998	-0,02960	0,6 - 17,4	1,374	-0,0304	-0,0300
1,4 - 19,2	2,992	-0,03200	0,6 - 17,0	1,370	-0,0320	-0,0320
1,4 - 18,6	2,986	-0,03440	0,6 - 16,4	1,364	-0,0344	-0,0344
1,4 - 18,0	2,98	-0,03680	0,6 - 15,8	1,358	-0,0368	-0,0368
1,4 - 17,4	2,974	-0,03920	0,6 - 15,2	1,352	-0,0392	-0,0392
1,4 - 16,6	2,966	-0,04240	0,6 - 14,4	1,344	-0,0424	-0,0424
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,2	1,342	-0,0432	-0,0436
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,0	1,340	-0,0440	-0,0440
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,0	1,340	-0,0440	-0,0440
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,0	1,340	-0,0440	-0,0440
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,0	1,340	-0,0440	-0,0440
1,4 - 16,2	2,962	-0,04400	0,6 - 14,0	1,340	-0,0440	-0,0440

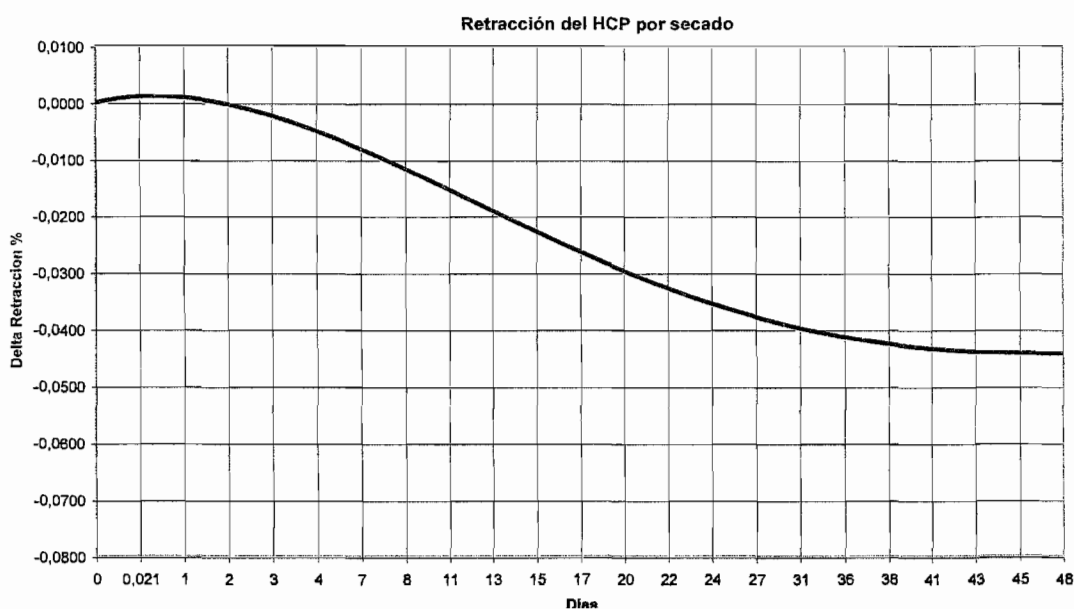


FIGURA 5.19 Cambio de longitud del HCP expuesto a secado

5.3.6 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en muestras de HCP 150x300 mm. a distintas edades.

TABLA 5.29 Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP – 3 días

Muestra No.	Tiempo us.	Tiempo s.	Velocidad m/s
16316-1	73,1	0,0000731	4060
16316-2	73,1	0,0000731	4060
16317-1	73,8	0,0000738	4021
16317-2	74,2	0,0000742	4001
Promedio	73,55	0,00007355	4036

TABLA 5.30 Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP – 7 días

Muestra No.	Tiempo us..	Tiempo s.	Velocidad m/s
16316-3	67,4	0,0000674	4450
16316-4	68,8	0,0000688	4360
16317-3	70,9	0,0000709	4230
16317-4	69,2	0,0000692	4340
Promedio	69,075	0,000069075	4345

TABLA 5.31 Resultados del ensayo de ultrasonido en HCP – 28 días

Muestra No.	Tiempo us.	Tiempo s.	Velocidad m/s
16317-5	67,3	0,0000673	4460
16317-6	69,3	0,0000693	4330
Promedio	68,3	0,0000683	4395

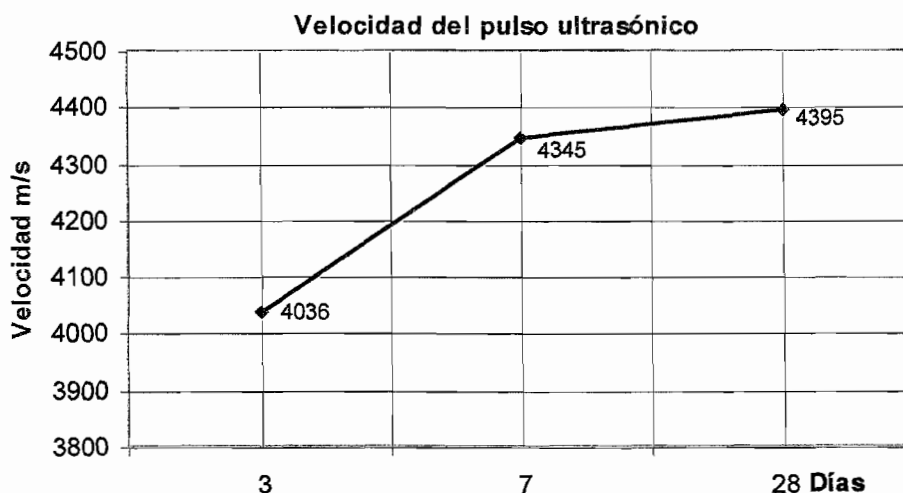


FIGURA 5.20 Desarrollo de la velocidad del pulso en HCP

5.3.7 Resultados del ensayo de rebote esclerométrico (ASTM C 805-02) en muestras de HCP.

TABLA 5.32 Resultados del ensayo de rebote esclerométrico en HCP-28 días

Muestra No.	X	s ±	Resistencia Rebote (MPa.)	Resistencia Real (MPa.)
16316-5	25,0	9,5	22,6	23,7
16316-5	26,5	8,6	24,0	23,7
16316-6	25,0	9,5	22,6	22,8



CIB-ESPOL

5.4 Resultados de los ensayos de caracterización del FT.

5.4.1 Resultados del ensayo de compresión simple (ASTM C39-03) en muestras de FT a distantes edades.

TABLA 5.33 Resultados de compresión simple en FT – 1 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-1	102	204	4,08	325,80	39,87

TABLA 5.34 Resultados de compresión simple en FT – 3 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa
16484-6	102	205	3,845	430,20	52,64

TABLA 5.35 Resultados de compresión simple en FT – 7 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16490-1	100	204	3,995	420,20	53,50

TABLA 5.36 Resultados de compresión simple en FT – 14 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-8	101	207	3,94	482,20	60,19

TABLA 5.37 Resultados de compresión simple en FT – 28 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-10	100	204	3,89	541,70	68,98

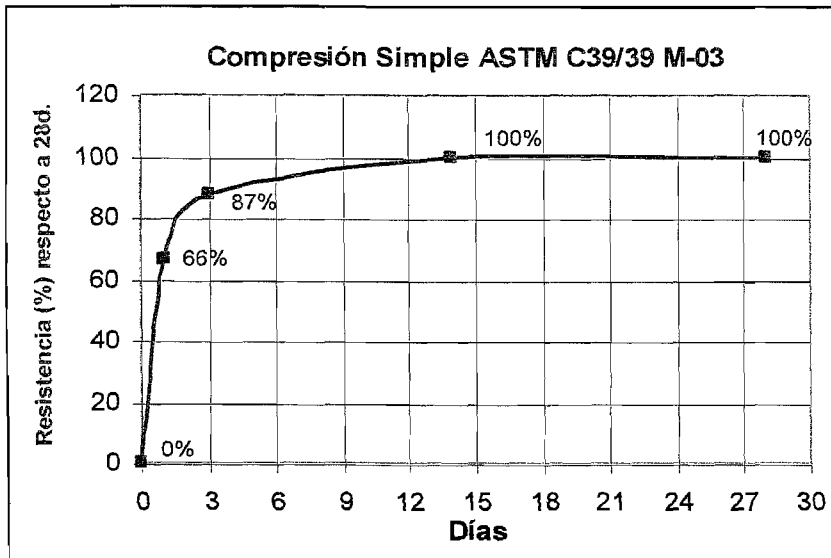


FIGURA 5.21 Desarrollo de resistencia obtenida por el HCP

5.4.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en muestras de FT a distantes edades.

TABLA 5.38 Resultados de T.C.D. en FT – 1 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-2	100	206	3,955	112,86	3,48

TABLA 5.39 Resultados de T.C.D. en FT – 3 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-4	100	205	3,96	164,70	5,11

TABLA 5.40 Resultados de T.C.D. en FT – 7 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16490-2	100	202	3,955	177,00	5,58

TABLA 5.41 Resultados de T.C.D. en FT – 14 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-7	101	206	4,04	214,30	6,56

TABLA 5.42 Resultados de T.C.D. en FT – 28 días

Muestra No.	Diámetro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura kN.	Resistencia MPa.
16484-9	100	204	3,93	212,40	6,63

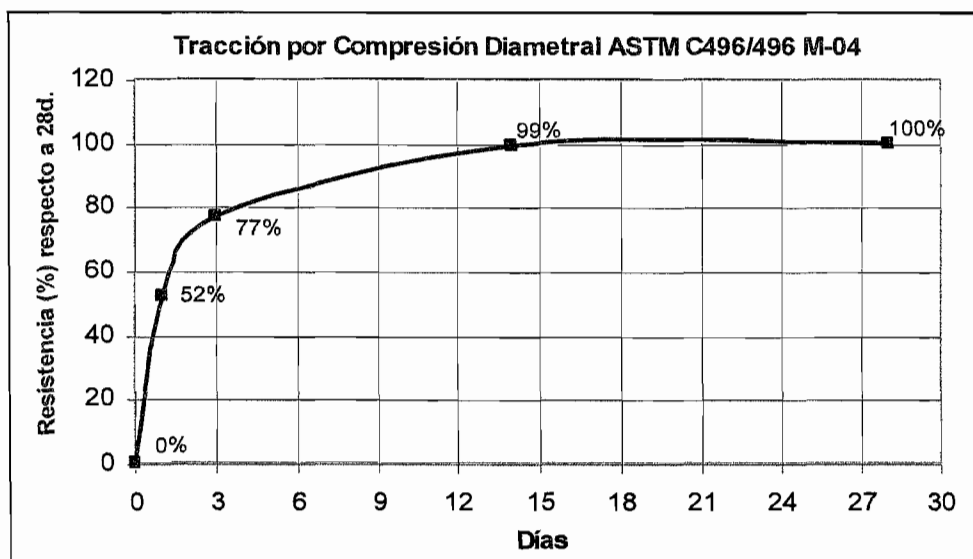


FIGURA 5.22 Desarrollo de resistencia obtenida por el FT



CIB-ESPOL

5.4.3 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de FT.

TABLA 5.43 Resultados del ensayo a flexión en FT – 14 días

Muestra No.	Ancho mm.	Altura mm.	Luz libre mm.	Carga de Rotura kN.	Mod. Rot. MPa
16498-1	154	156	450	53,54	6,43

TABLA 5.44 Resultados del ensayo a flexión en FT – 28 días

Muestra No.	Ancho mm.	Altura mm.	Luz libre mm.	Carga de Rotura kN.	Mod. Rot. Mpa
16485-3	158	155	450	67,50	8,00
16485-4	154	155	450	70,47	8,57
Promedio					8,29

5.4.4 Resultados del ensayo módulo de elasticidad. (ASTM C 469-02) del FT.

TABLA 5.45 Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad

Muestra:	16485-1
Edad:	28 días
Condición:	Muestra (húmeda)
Diámetro:	150 mm
Longitud:	300 mm
Resistencia máx:	68,00 MPa
Area:	17671 mm. ²
40% carga	217,0 kN.
40% resisten	27,2 MPa.

TABLA 5.46 Resultados del ensayo módulo de elasticidad del FT

Lect. 1	Lect. 2	Prom. Lectura	Carga	Promedio
		Deformímetro LC-2M	kN.	Deformación mm
1,50	1,50	1,50	46,35	1,50E-02
2,40	2,50	2,45	56	2,45E-02
6,20	6,20	6,20	112	6,20E-02
9,80	9,70	9,75	170	9,75E-02

TABLA 5.47 Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo-deformación

Esfuerzo MPa.	Deformación Unitaria
2,6	0,00005
3,2	0,00008
6,3	0,00021
9,6	0,00033
E= 25,4 GPa.	

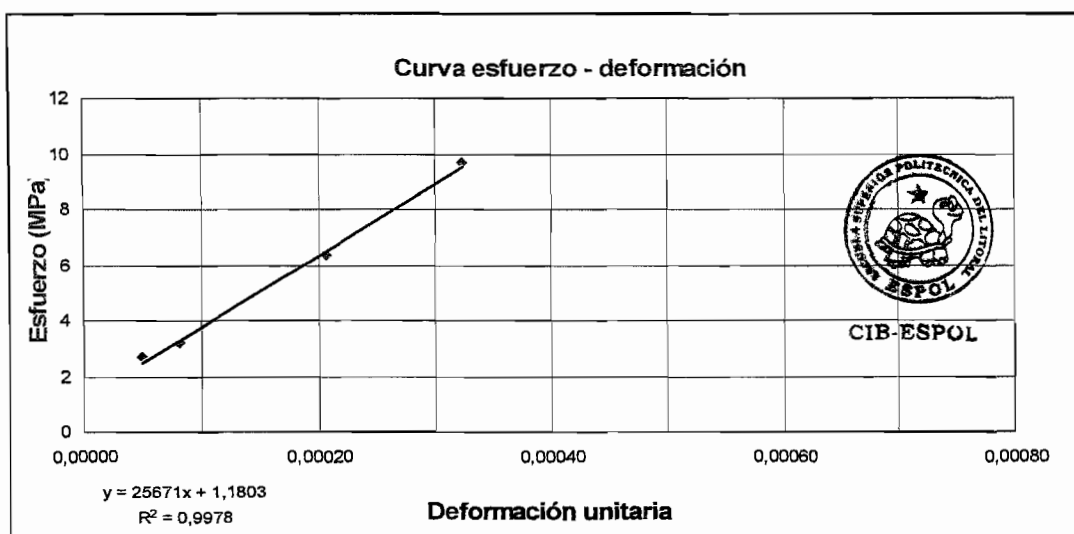


FIGURA 5.23 Curva esfuerzo – deformación para el FT

TABLA 5.48 Datos empleados para cálculo del módulo de elasticidad

Muestra:	16485-2
Edad:	28 días
Condición:	Muestra (Húmeda)
Diámetro:	150 mm.
Longitud:	300 mm.
Resistencia máx:	68,00 MPa.
Área:	1761 mm.2
40% carga	217,0 kN.
40% resisten	27,2 MPa.

TABLA 5.49 Resultados del ensayo módulo de elasticidad del FT

Lect. 1	Lect. 2	Prom. Lectura Deformímetro LC-2M	Carga kN.	Promedio Deformación mm.
1,50	1,50	1,50	46,45	1,50E-02
2,50	2,60	2,55	56	2,55E-02
5,60	5,60	5,60	112	5,60E-02
9,40	9,30	9,35	170	9,35E-02

TABLA 5.50 Datos empleados para cálculo de la curva esfuerzo-deformación

Esfuerzo	Deformación
MPa	Unitaria
2,6	0,00005
3,2	0,00009
6,3	0,00019
9,6	0,00031
E= 26,7 Gpa.	

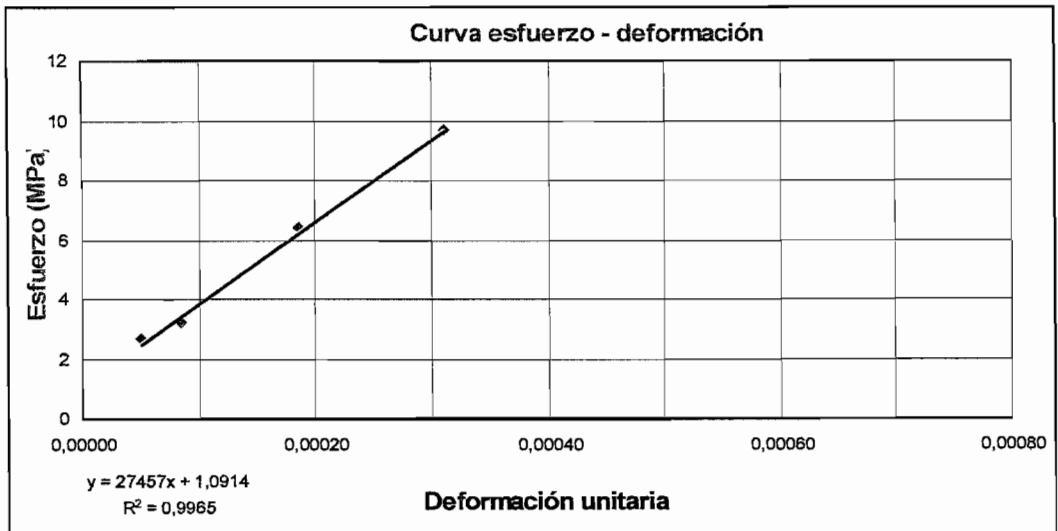


FIGURA 5.24 Curva esfuerzo – deformación para el FT

Promediando los dos ensayos realizados el módulo de elasticidad para el FT es **26,05 GPa.**



CIB-ESPOL

5.4.5 Resultados del ensayo de retracción por secado (ASTM C157-04) en muestras de FT.

TABLA 5.51 Resultados ensayo de retracción por secado del FT

Lectura 1	Lec. (mm)	Δ (%)	Lectura 2	Lec. (mm)	Δ (%)	Lectura 3	Lec. (mm)	Δ (%)	Δ (%) Prom.
1,9 - 13,6	3,936	0,0000	1,1 - 17,8	2,378	0,00000	1,5 - 15,2	3,1520	0,00000	0,00000
1,9 - 13,4	3,934	-0,0008	1,1 - 18,0	2,380	0,00080	1,5 - 15,2	3,1520	0,00000	0,00000
1,9 - 8,0	3,88	-0,02240	1,1 - 12,4	2,324	-0,02160	1,5 - 11,2	3,1120	-0,01600	-0,02000
1,9 - 7,6	3,876	-0,02400	1,1 - 12,2	2,322	-0,02240	1,5 - 11,2	3,1120	-0,01600	-0,02080
1,9 - 6,6	3,866	-0,02800	1,1 - 10,6	2,306	-0,02880	1,5 - 10,0	3,1000	-0,02080	-0,02587
1,9 - 6,4	3,864	-0,02880	1,1 - 10,6	2,306	-0,02880	1,5 - 10,0	3,1000	-0,02080	-0,02613
1,9 - 6,4	3,864	-0,02880	1,1 - 10,6	2,306	-0,02880	1,5 - 10,0	3,1000	-0,02080	-0,02613
1,9 - 6,0	3,860	-0,03040	1,1 - 9,6	2,296	-0,03280	1,5 - 9,60	3,0960	-0,02240	-0,02853
1,9 - 5,0	3,850	-0,03440	1,1 - 8,6	2,286	-0,03680	1,5 - 8,60	3,0860	-0,02640	-0,03253
1,9 - 4,6	3,846	-0,03600	1,1 - 8,2	2,282	-0,03840	1,5 - 8,20	3,0820	-0,02800	-0,03413
1,9 - 4,0	3,840	-0,03840	1,1 - 7,8	2,278	-0,04000	1,5 - 7,80	3,0780	-0,02960	-0,03600
1,9 - 3,8	3,838	-0,03920	1,1 - 7,6	2,276	-0,04080	1,5 - 7,60	3,0760	-0,03040	-0,03680
1,9 - 3,2	3,832	-0,04160	1,1 - 7,0	2,270	-0,04320	1,5 - 7,00	3,0700	-0,03280	-0,03920
1,9 - 3,0	3,830	-0,04240	1,1 - 6,6	2,266	-0,04480	1,5 - 6,60	3,0660	-0,03440	-0,04053
1,9 - 2,6	3,826	-0,04400	1,1 - 6,0	2,260	-0,04720	1,5 - 6,00	3,0600	-0,03680	-0,04267
1,9 - 2,0	3,820	-0,04640	1,1 - 5,6	2,256	-0,04880	1,5 - 5,60	3,0560	-0,03840	-0,04453
1,9 - 1,8	3,818	-0,04720	1,1 - 5,4	2,254	-0,04960	1,5 - 5,40	3,0540	-0,03920	-0,04533
1,9 - 1,2	3,812	-0,04960	1,1 - 4,8	2,248	-0,05200	1,5 - 4,80	3,0480	-0,04160	-0,04773
1,9 - 1,0	3,810	-0,05040	1,1 - 4,6	2,246	-0,05280	1,5 - 4,60	3,0460	-0,04240	-0,04853
1,9 - 1,0	3,810	-0,05040	1,1 - 4,6	2,246	-0,05280	1,5 - 4,60	3,0460	-0,04240	-0,04853
1,9 - 1,0	3,810	-0,05040	1,1 - 4,6	2,246	-0,05280	1,5 - 4,60	3,0460	-0,04240	-0,04853
1,9 - 1,0	3,810	-0,05040	1,1 - 4,6	2,246	-0,05280	1,5 - 4,60	3,0460	-0,04240	-0,04853
1,9 - 1,0	3,810	-0,05040	1,1 - 4,6	2,246	-0,05280	1,5 - 4,60	3,0460	-0,04240	-0,04853

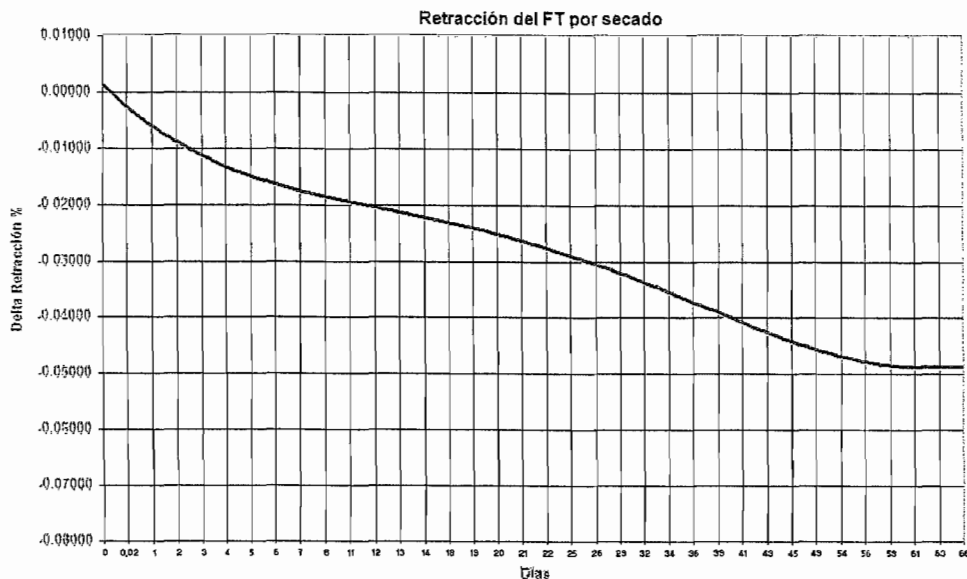


FIGURA 5.25 Cambio de longitud del FT expuesto a secado

5.4.6 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en muestras de FT 100 x 200 mm. a distintas edades.

TABLA 5.52 Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 1 día

Muestra No.	Tiempo us.	Tiempo s.	Velocidad m/s
16484-1	46,2	0,0000462	4410
16484-2	46,4	0,0000464	4440
Promedio	46,3	0,0000463	4425

TABLA 5.53 Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 3 días

Muestra No.	Tiempo us	Tiempo s.	Velocidad m/s
16484-4	43,7	0,0000437	4690
16484-6	43,6	0,0000436	4700
Promedio	43,65	0,00004365	4695

TABLA 5.54 Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 7 días

Muestra No.	Tiempo us	Tiempo s.	Velocidad m/s
16484-7	41,6	0,0000416	5010
16484-8	43,1	0,0000431	4800
Promedio	42,35	0,00004235	4905

TABLA 5.55 Resultados del ensayo de ultrasonido en FT – 28 días

Muestra No.	Tiempo us	Tiempo s.	Velocidad m/s
16484-9	40,9	0,0000409	4890
16484-10	41,9	0,0000419	4770
Promedio	41,4	0,0000414	4830



Velocidad del pulso ultrasónico

CIB-ESPOL

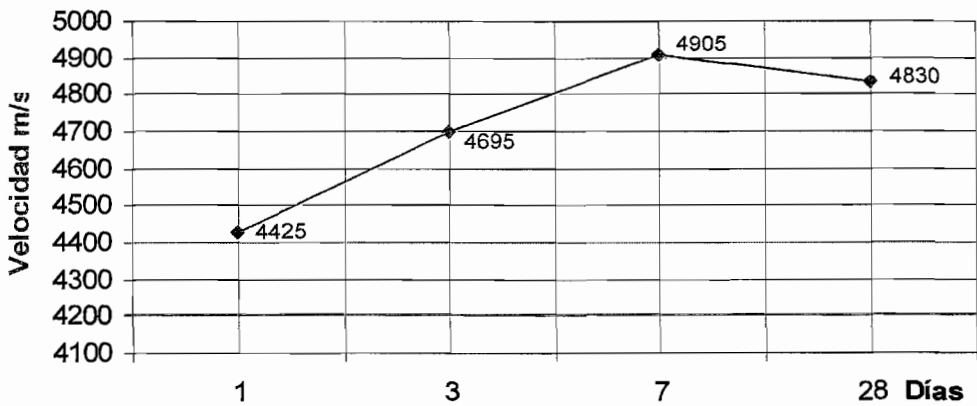


FIGURA 5.26 Desarrollo de la velocidad del pulso en FT



CIB-ESPOL

5.5 Resultados de los ensayos de caracterización del HCP+FT.

5.5.1 Resultados del ensayo de flexión (ASTM C78-02) en muestras de HCP+FT a distintas edades.

TABLA 5.56 Resultados del ensayo a flexión en HCP+FT

Muestra No.	Edad	Ancho mm.	Altura mm.	Luz libre mm.	Carga de Rotura kN.	Mod. Rot. MPa.
16521-1	1	153	155	450	21,59	2,64
16521-2	3	155	153	450	31,65	3,93
16521-3	7	150	153	450	33,73	4,32
16521-4	28	152	155	450	43,30	5,34

TABLA 5.57 Resultados del ensayo a flexión en HCP+FT en posición invertida a la colocación de moldeo

Muestra No.	Edad	Ancho mm.	Altura mm.	Luz libre mm.	Carga de Rotura kN.	Mod. Rot. Mpa
16578-1	1	155	150	450	40,13	5,18
16578-2	3	153	155	450	49,13	6,01
16578-3	7	153	155	450	52,35	6,41
16578-4	28	157	155	450	55,06	6,57

5.5.2 Resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (ASTM C496-04) en núcleos calados en vigas de HCP+FT a distintas edades.

TABLA 5.58 Resultados de núcleos de HCP+FT ensayados a T.C.D.

Muestra No.	Edad	Diametro mm.	Altura mm.	Peso Kg.	Carga de Rotura Kn	Resistencia MPa.	Promedio MPa.
16526-1	1	100	154	2,805	58,90	2,43	2,49
16526-2	1	100	153	2,825	61,05	2,54	
16526-3	3	100	155	2,860	67,70	2,78	2,89
16526-4	3	100	154	2,845	72,70	3,01	
16526-5	7	100	153	2,835	78,90	3,28	3,44
16526-6	7	100	153	2,890	86,50	3,60	
16526-7	28	100	154	2,924	94,40	3,90	3,77
16526-8	28	100	154	2,916	85,90	3,55	

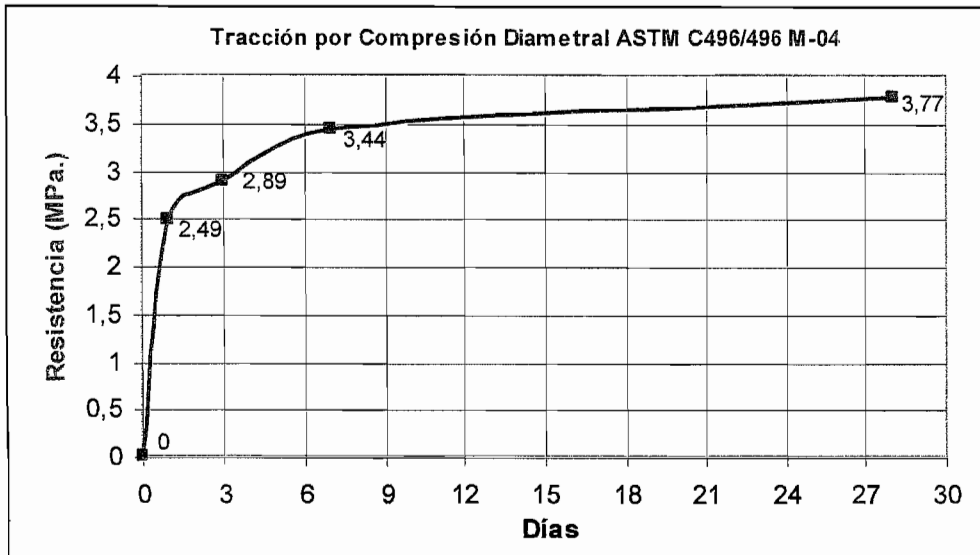


FIGURA 5.27 Desarrollo de resistencia obtenida en núcleos de HCP+FT

5.5.3 Resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597-02) en vigas de HCP+FT.

TABLA 5.59 Resultados del ensayo de ultrasonido en muestra HCP+FT en condición seca

Punto No.	Tiempo us	Tiempo s.	Velocidad m/s
1	36,8	0,0000368	4080
2	35,7	0,0000357	4200
3	35,7	0,0000357	4200
4	36,5	0,0000365	4110
5	35,6	0,0000356	4210

TABLA 5.60 Resultados del ensayo de ultrasonido en muestra HCP+FT en condición saturada

Punto No.	Tiempo us	Tiempo s.	Velocidad m/s
1	36,6	0,0000366	4110
2	36,4	0,0000364	4120
3	35,2	0,0000352	4260
4	35,6	0,0000356	4210
5	35,3	0,0000353	4250

CAPÍTULO 6



CIB-ESPOL

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1 Análisis de los resultados obtenidos en el HCP.

6.1.1 Justificación de las combinaciones granulométricas usadas en los ensayos proctor.

La dosificación utilizada para este ensayo mostrada en la tabla 5.5 parte con una constante que es el cemento empleando 250 kg/m³ tomando como referencia experiencias previas realizadas en el Centro Técnico del Hormigón, en el primer caso como consta en la misma tabla se utilizó 30% de arena triturada del contenido de agregados y el restante del 100% distribuido en partes iguales entre la piedra No.7 y No.67, en los posteriores ensayos se mantuvo la constante (cemento) y se incrementó el porcentaje de arena triturada.

La combinación granulométrica mostrada en la figura 6.5 utilizando la proporción de agregados descrita en la tabla 5.5, si bien no se enmarca dentro de las recomendaciones del ACI 325R.10 para un hormigón

compactado con rodillo, lo que se busca es optimizar dicha mezcla utilizando el ensayo proctor para determinar el contenido apropiado de arena de trituración con la cual se permita obtener una densidad seca máxima y humedad óptima dentro de la serie de ensayos y que además posea una textura superficial abierta (gruesa / rugosa) que permita desarrollar una mejor adherencia en la interfase HCP+FT, una vez determinado el porcentaje de arena óptimo será posible establecer el diseño final para el HCP tomando en cuenta los requerimientos anteriormente mencionados.

6.1.2 Selección del porcentaje óptimo de arena de trituración

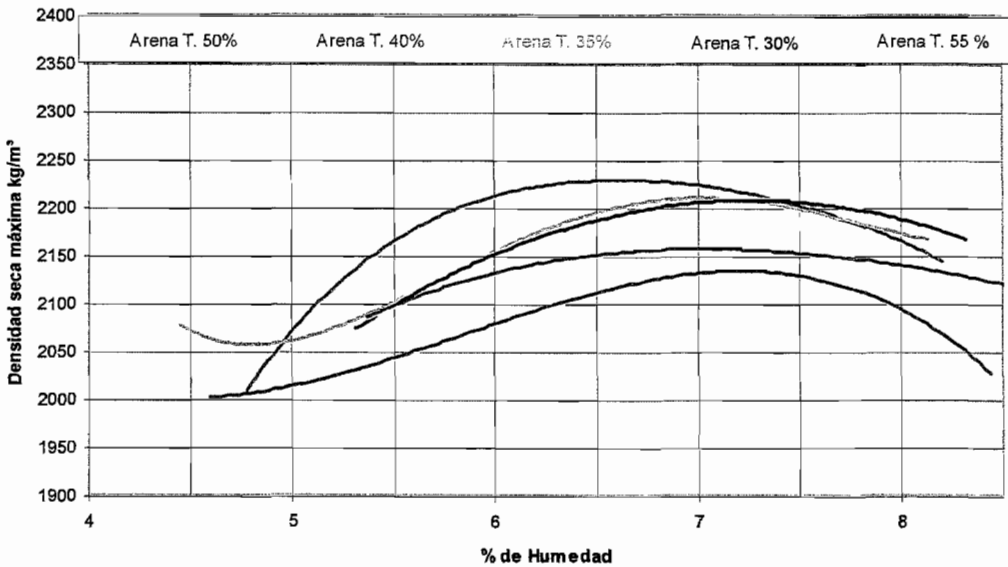


FIGURA 6.1 Resumen comparativo de curvas de ensayos proctor

En la figura comparativa 6.1 es apreciable que la curva de color azul que pertenece a la combinación con el 40% de arena de trituración es la que

ofrece una mayor densidad seca máxima en relación al resto de combinaciones, y su respectiva humedad óptima es la que permitirá establecer el diseño más conveniente del HCP.

Para visualizar de una manera más sencilla lo anteriormente explicado se ha graficado en la figura 6.2 la densidad máxima obtenida para cada porcentaje de arena triturada utilizada en las pruebas proctor, cuyo pico o la mayor densidad máxima se consigue al utilizar 40% de arena triturada en la combinación de agregados.

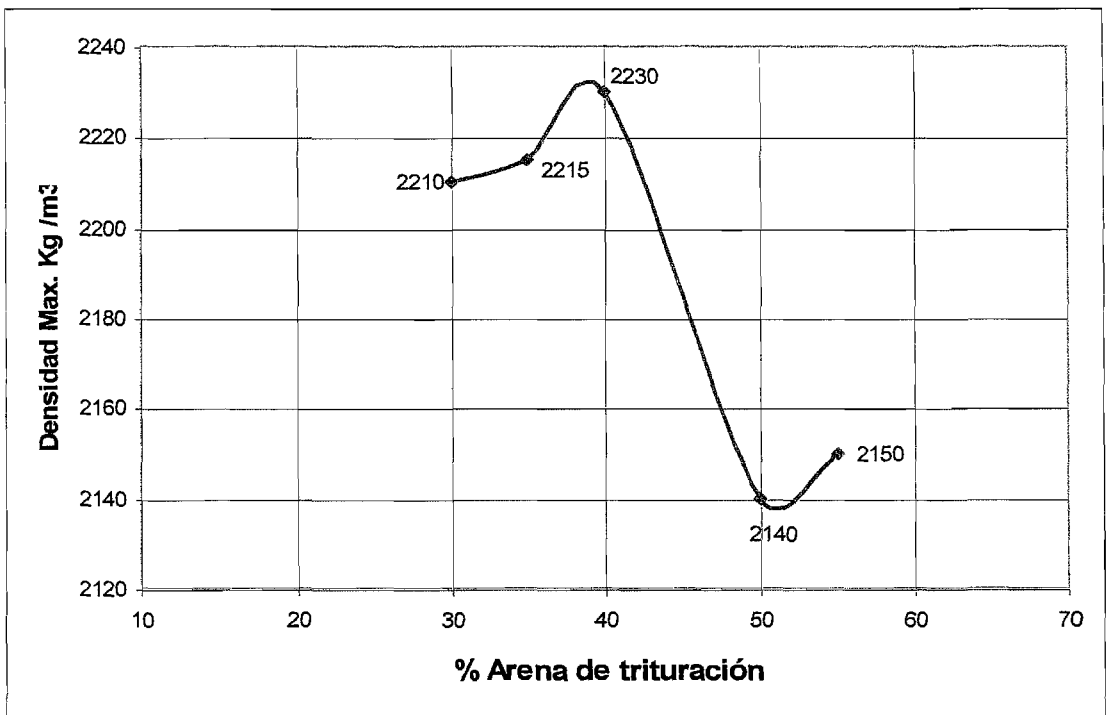


FIGURA 6.2 Cuadro comparativo densidad máx. vs. % arena

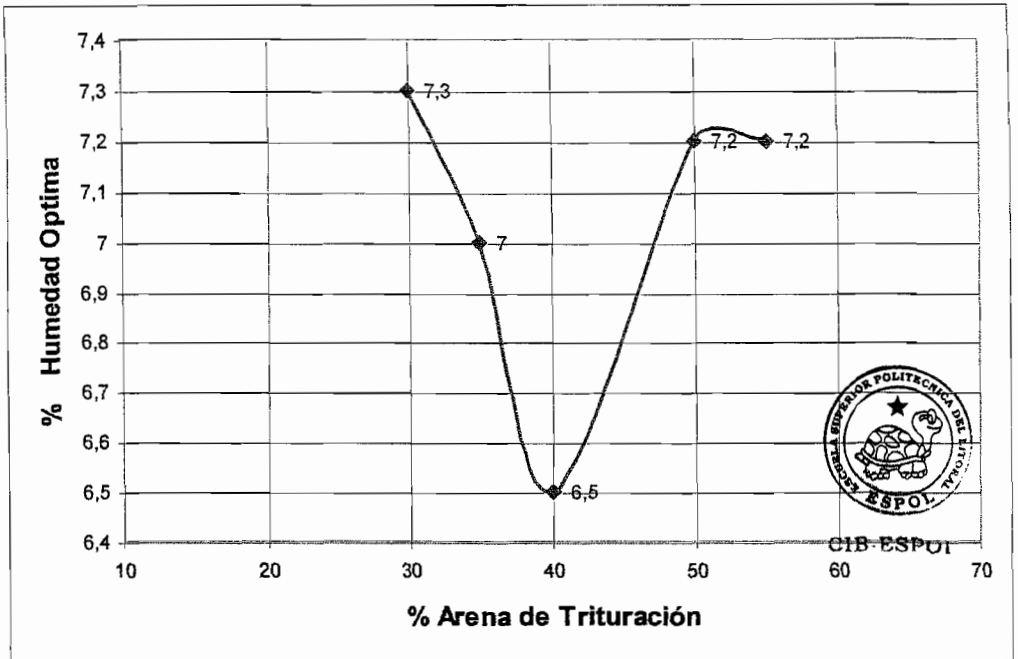


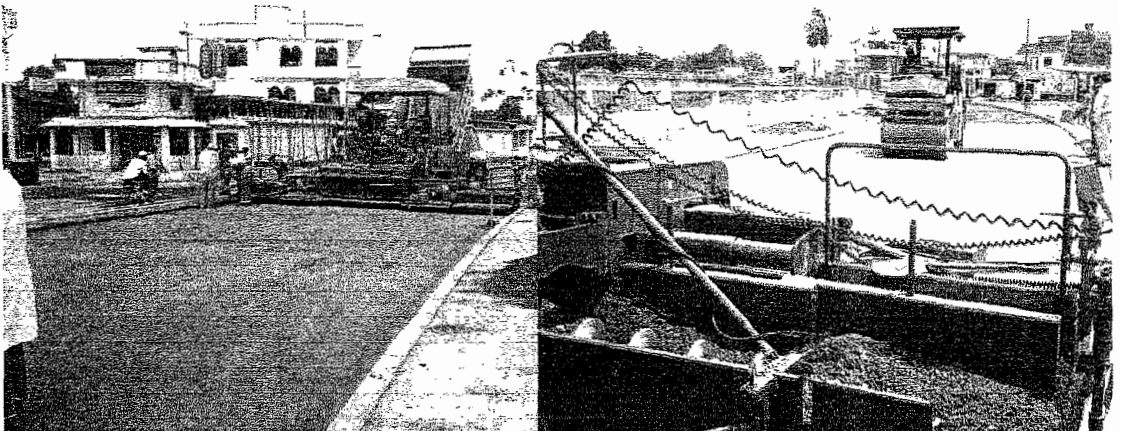
FIGURA 6.3 Cuadro comparativo humedad óptima vs. % arena

Siguiendo la misma secuencia de análisis se graficó en la figura 6.3 el % de humedad óptima obtenida para cada porcentaje de arena triturada utilizada en las pruebas proctor en donde la menor cantidad de agua requerida se consigue utilizando 40% de arena de trituración en la combinación de agregados.

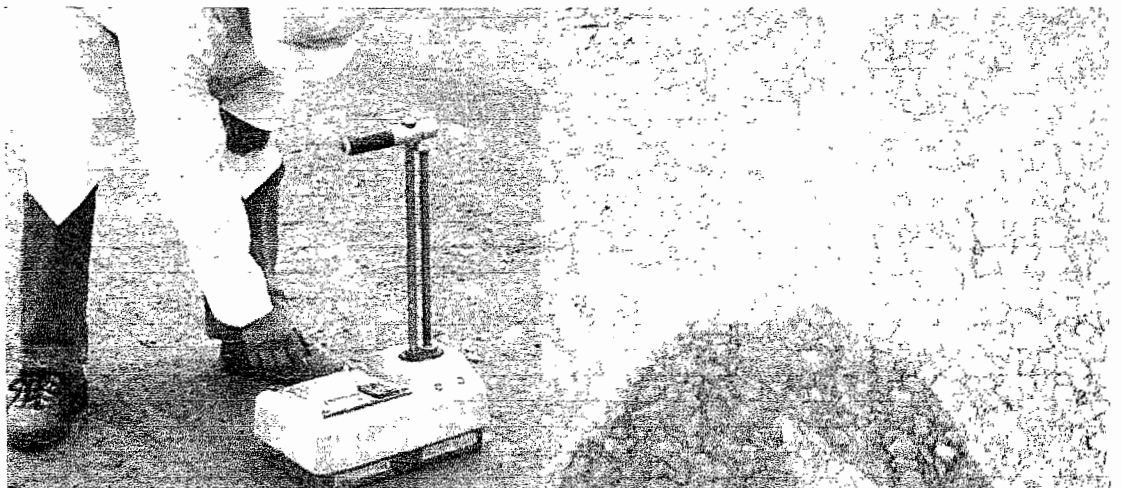
Es importante recalcar que se cumple el principio de que la mayor densidad se alcanza con la menor cantidad de agua posible, el cual es un requerimiento indispensable en el HCP, de esta manera se puede afirmar que el porcentaje óptimo de arena de trituración para HCP es del 40% del contenido de agregados.

6.1.3 Obtención del diseño final del HCP.

La densidad máxima obtenida de los ensayos proctor en laboratorio fué 2230 Kg/m^3 , sin embargo, para obtener el diseño final de HCP de la experiencia lograda en pruebas de campo en un tramo pavimentado con HCP en la Av. 17 de Septiembre en la ciudad de Milagro y utilizando el equipo de campo disponible se ajustó la densidad de 2230 a un valor óptimo de 2220 Kg/m^3 .



(a) Colocación y compactación del HCP



(b) Control de la densidad y textura obtenida

FIGURA 6.4 Tramo pavimentado con HCP en la ciudad de Milagro

El diseño se obtuvo conservando el 40% de arena de trituración en la combinación de agregados, y 250 Kg/m³ como contenido de cemento, se tomó en cuenta el porcentaje de absorción de los agregados para determinar el contenido de agua para la mezcla, teniendo como base el contenido de humedad óptimo de 6,5% determinado en las pruebas proctor, a partir de estas premisas se obtuvo el diseño final del HCP mostrado a continuación la tabla 6.1.

TABLA 6.1 Proceso de cálculo para dosificación del HCP

Dosificación	Kg/m ³	Contenido de Agregados		
Cemento IP (HE):	250			
Piedra TM 12 mm:	594	30,00%		
Piedra TM 19 mm:	594	30,00%		
Arena triturada:	792	40,00%		
Densidad Teórica:	2230			
(a) Diseño base del HCP				
Dosificación	kg/m ³	Contenido de Agregados	% Absorción	
Cemento IP (HE):	250		%	Kg/m ³
Piedra TM 12 mm:	591	30,00%	1,5	8,9
Piedra TM 19 mm:	591	30,00%	1,5	8,9
Arena triturada:	788	40,00%	3,0	23,6
Densidad Campo:	2220		TOTAL	41,37
Agua Total	144,3	Agua Efectiva=Agua Total - 41,37 ; Rel. a/c = 0,41		
Agua Efectiva	103			
Polyheed RI	1% del contenido de cemento			

(B) Diseño final para el HCP

6.2 Análisis de los ensayos obtenidos en el FT.

6.2.1 Obtención del diseño final del FT.

La obtención de la dosificación del FT tomo como base un diseño utilizado en experiencias previas en el Centro Técnico del Hormigón, en los cuales se ajustó el porcentaje de aditivo superplastificante utilizado a un 1,27 % del contenido de cemento, y la adición de Zeolita en un 10 % del contenido de cemento, basado en el estudio realizado recientemente en que la adición de Zeolita en esta proporción mejora las cualidades del hormigón principalmente la resistencia, de esta manera el diseño final del FT es el siguiente:

TABLA 6.2 Diseño Final de FT

Dosificación	Kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento tipo I:	450	
Piedra No. 7:	532,8	60%
Piedra No. 67:	355,2	40%
Arena triturada:	531,3	70%
Arena de río:	227,7	30%
Densidad	2097,0	
Zeolita	10% del contenido de cemento	
Hipermix	1,23 % del contenido de cemento	
Agua	130	Rel. a/c = 0,29



CIB-ESPOL

6.3 Análisis de los ensayos obtenidos en el HCP+FT.

6.3.1 Análisis de la adherencia en la interfase HCP+FT mediante ensayos destructivos.

Tomando como base un pavimento que en HCP requiere una carpeta de 23 cm. de espesor, y asumiendo que se construya con una capa de 16 cm. HCP y otra de 7 cm. en FT se hicieron ensayos con vigas de 15 x 15 x 50, que se llenaron hasta los 2/3 de su altura con HCP y el 1/3 restante con FT y con núcleos calados de las mismas vigas.

Los núcleos calados se sometieron a la prueba de tracción por compresión diametral ASTM C496/ C 496 M-04, y las vigas a rotura por flexotracción ASTM C78-02, con cargas aplicadas en los tercios medios.

La principal razón de estos ensayos es la determinación de la adherencia desarrollada en la interfase HCP+FT

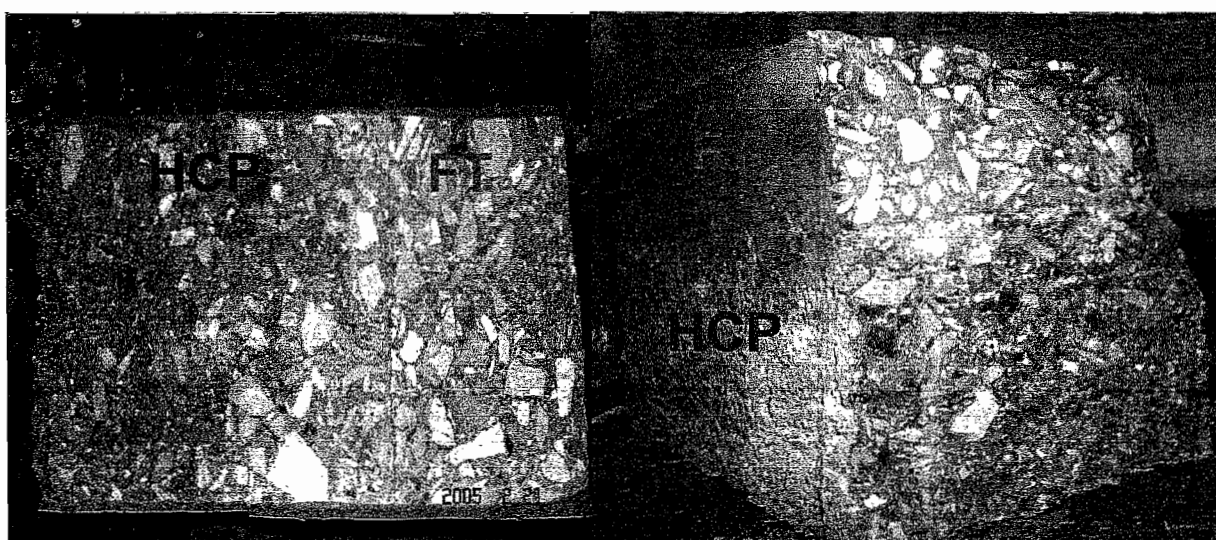


FIGURA 6.5 Muestras ensayadas soportaron la rotura sin mostrar desprendimiento en la interfase

En la figura 6.5 se puede observar como las probetas ensayadas soportaron la rotura sin que las dos capas se separarán, demostrando la total adherencia desarrollada obteniendo igual comportamiento en todas las muestras ensayadas a distintas edades.

Al someter los núcleos a rotura por compresión diametral los esfuerzos de tracción que se producen son todos perpendiculares al plano de falla, su influencia en la interfase podría no ser suficientemente representativa de la adherencia. En la prueba de tracción por flexión se producen esfuerzos tangenciales de corte en la interfase cuya cuantificación es sencilla de realizar y permite ser tomada como demostrativa de la adherencia entre las dos capas

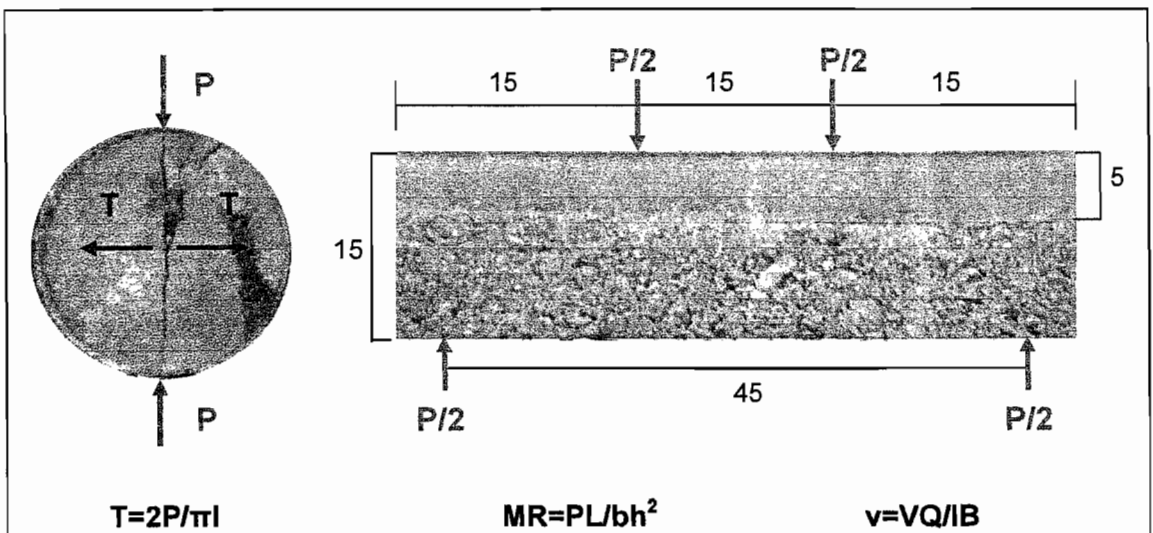


FIGURA 6.6 Aplicación de cargas en ensayo de tracción por compresión diametral y tracción por flexión

El módulo de rotura obtenido a los 28 días en posición de moldeo es de $MR = 5.34$ MPa (Tabla 5.56). Para obtener ese resultado la fuerza que debe aplicarse en la prueba es de $P = MR \cdot b \cdot h^2 / L = 43.30$ kN.

Las reacciones $P/2$ son de 21.65 kN. cada una, con cuyo valor se puede determinar el esfuerzo de corte tangencial en la interfaz. Este esfuerzo debe ser contrarrestado por la adherencia para garantizar el trabajo conjunto de las dos capas y su valor está dado por la ecuación:

$$v = V \cdot Q / I \cdot b$$

en la que:

$$V = P/2 = 21.65 \text{ kN.}$$

$$Q = bh_f (h - h_f) / 2 = 37.50 \times 10^4 \text{ (altura de capa de FT en la viga: } h_f = 50 \text{ mm.)}$$

$$I = bh^3 / 12 = 4218.75 \times 10^4 \text{ (momento de inercia de la sección)}$$

$$v = 1.22 \text{ MPa.}$$

Como al efectuarse la rotura de las vigas no se producen desprendimientos en la interfase, los esfuerzos de corte tangencial, que pueden ser soportados por la adherencia son necesariamente mayores a 1.22 MPa.

Existe una correlación entre el módulo de rotura MR y la resistencia cilíndrica a la compresión $f'c$ que, obedece con suficiente aproximación a la ecuación:

$$MR = 0.392 (f'c)^{2/3} \text{ (ACI 330R)}$$

De acuerdo con esta ecuación para un hormigón de módulo de rotura $MR = 5.34$ MPa., la resistencia a la compresión debe ser $f'c = 50,3$ MPa.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

El esfuerzo de corte que puede soportar un hormigón de resistencia a la compresión $f'c$ es de :

$$v_c = 0.3 (f'c)^{0.5}$$

En nuestro caso, el esfuerzo de corte que puede soportar el hormigón de $f'c = 50.3$ es:

$$v_c = 0.3 (50.3)^{0.5} = 2.13 \text{ MPa.}$$

Sobre la **Resistencia de la adherencia**, el Ing. Carlos Joffre, en su estudio sobre **Refuerzos de Pavimentos de Concreto**, dice lo siguiente:

“Se estima que una resistencia a esfuerzo cortante del orden 1.4 MPa. es suficiente para resistir los esfuerzos cortantes y garantizar que se mantiene la adherencia. Esta cifra se estableció en un estudio de laboratorio realizado en 1956, en el que se comprobaron los resultados ensayados de flexotracción realizados tanto sobre probetas monolíticas como sobre otras fabricadas en dos capas (adheridas). Con resistencias al corte de 1.4 MPa las probetas en dos capas proporcionaron resistencias similares a las de las probetas monolíticas”.

Basados en esas experiencias se puede afirmar que, en el caso que nos ocupa, el hormigón de $MR = 5.34$, que soporta un esfuerzo de corte de 2.13 MPa (mayor que 1.4 MPa.), garantiza que se mantiene la adherencia necesaria.

6.3.2 Análisis de los esfuerzos tangenciales en la interfase producidos por diferenciales de retracción.

Como los hormigones diseñados para el HCP y para el FT, a pesar de tener relaciones a/c similares, 0.4 y 0.3 respectivamente, por el hecho de tener contenidos de cemento diferente, pueden producirse retracciones cuyo diferencial debe ser tomando en consideración.

El ensayo ASTM C157/C 157M-04, *Standard test method for length change of hardened hydraulic – cement mortar and concrete*, cuyos resultados se encuentran en las tablas 5.28 y 5.51, permiten evaluar las retracciones que se producen en el HCP y el FT, y establecer la retracción relativa entre los dos, que genera esfuerzos de corte tangencial en la interfaz.

Del ensayo mencionado el HCP tiene una retracción de 440×10^{-6} y el FT tiene una retracción de 485×10^{-6} . El diferencial de retracción es de 45×10^{-6} .

Para efectos de este análisis se adopta una losa de 3.75 x 5.00 m., limitada por juntas aserradas. Estas son dimensiones normales en un pavimento rígido.

Las deformaciones mayores se producen en la dirección del eje de la vía, es decir, en una longitud de 5.00 m., En el centro las deformaciones por retracción son nulas, por lo que las deformaciones totales a cada extremo de la losa serán:

$$45 \times 10^{-6} \times 2.5 = 112.5 \times 10^{-6}$$

Con un módulo de elasticidad de 26 GPa. y con la deformación arriba calculada el esfuerzo longitudinal máximo es de:

$$112.5 \times 10^{-6} \times 26000 = 2.93 \text{ MPa.}$$

Como el espesor del FT es de 7cm, la fuerza por centímetro de ancho de losa es de:

$$2.93 \times 7 = 20.51 \text{ MPa.cm} = 2.05 \text{ kN.}$$

Esta fuerza genera, en una faja de 2.5×0.01 m. de la interfase entre HCP y FT, un esfuerzo de corte tangencial de:

$$\sigma_t = 2.05 / (2.5 \times 0.01) = 82 \text{ kN/m}^2 = 0.082 \text{ MPa.}$$

Este esfuerzo es mucho menor (menos del 5%), que el esfuerzo tangencial que soportan las probetas sometidas a rotura por flexotracción a un día de edad, sin desprendimientos en la interfaz. Por consiguiente.

Los esfuerzos producidos por la diferencia de retracción entre el HCP y el FT no son lo suficientemente importantes como para producir desprendimientos de las dos capas.

El procedimiento de cálculo empleado en la sección 6.3.1 y 6.3.2 está basado en análisis encontrado en la Monografía n.017, del Centro Técnico del Hormigón, de autoría del Ing. José Camposano Luque.



6.3.3 Análisis de los esfuerzos generados por gradientes térmicos en la interfase HCP+FT

Por otra parte, como pueden presentarse en los pavimentos esfuerzos tangenciales a nivel de la interfase, como consecuencia del alabeo generado por el gradiente térmico en la capa de FT, se ha considerado los que se producen en la losa tipo de la sección anterior (6.3.2) de 3.50 x 5.00 m. y un espesor de 7 cm.

Con un coeficiente de expansión térmica de $6.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. y con un diferencial de temperatura de 4.6°C para 7cm, los esfuerzos máximos que se generan son:

$$\sigma_{tx} = 0.57 \text{ MPa.}$$

Estos esfuerzos no se producen simultáneamente con aquellos generados por la retracción, pero podría ocurrir ocasionalmente que coincidan bajo determinadas condiciones climáticas. Por eso y como condición límite, la suma de los dos produce un esfuerzo tangencial total de

$$0.082 + 0.57 = 0,652 \text{ MPa.}$$

Este esfuerzo es menor que 1.4 MPa, que según las experiencias europeas es el límite dentro del cual se garantiza que se mantiene la adherencia, y que 2.13 MPa. que es el esfuerzo cortante que soporta un hormigón de MR = 5.34 MPa. (sección 6.3.1).

6.3.4 Análisis de los resultados obtenidos mediante mediante el ensayo de ultrasonido en el HCP+FT.

Los resultados obtenidos en las tablas 5.59 y 5.60 corresponden al ensayo del ultrasonido ASTM C597-02 realizado en una viga de HCP+FT en estado seco y en estado saturado posteriormente como se observa en la figura 6.7.

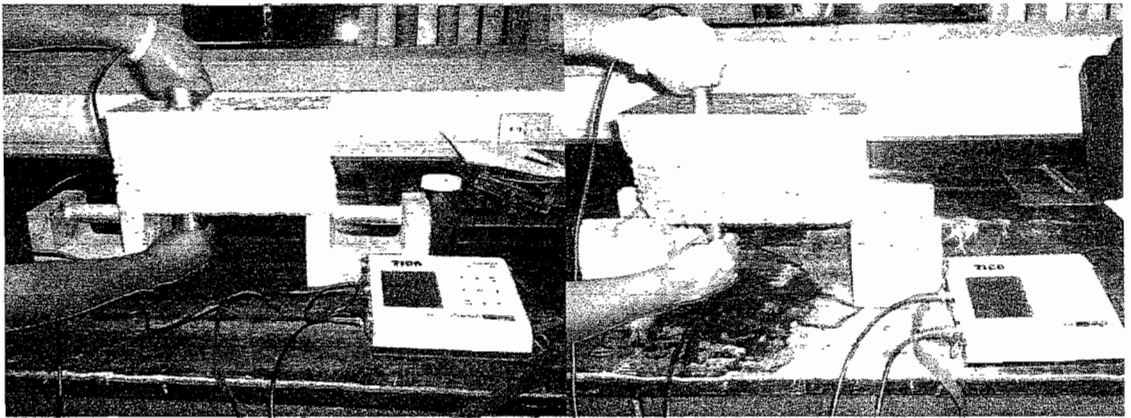


FIGURA 6.7 Ultrasonido en viga de HCP+FT en estado seco y saturado

Haciendo un primer análisis de las tablas mencionadas vistas de manera individual se observa que la velocidad es prácticamente constante en cada uno de los puntos medidos, consecuentemente la velocidad también es similar en cada lectura. Por lo tanto podemos concluir que estamos en presencia de un elemento isótropo (uniforme) sin agrietamientos ni deterioros, sin presencia de discontinuidades.

El segundo análisis que se realizó fue comparar la lecturas del tiempo recorrido por la onda en dos estados, tomando en cuenta que la velocidad de la onda viaja rápidamente a través de un hueco lleno de agua que a través

de un hueco lleno de aire, se observa que existe una diferencia mínima entre la velocidad de pulsación ultrasónica en estado saturado con respecto a la velocidad en estado seco, lo cual nos permite decir con seguridad que el HCP+FT tiene una muy buena compactación, con una cantidad ínfima de espacios vacíos, sin discontinuidades, y que no presenta discontinuidades a nivel de interfase actuando de manera monolítica.

6.3.5 Relación entre el Módulo de Rotura y la prueba de tracción por compresión diametral.

Este análisis se realiza ya que si se tiene que determinar la resistencia del hormigón de un pavimento in situ: la extracción de núcleos así como los ensayos en éstos, en tracción por compresión diametral, es mucho más fácil que aserrar vigas para obtener el módulo de rotura, es así que se presenta la siguiente tabla:

TABLA 6.3 Relación entre el MR/TCD a los 28 días

	HCP	FT	HCP+FT
MR (MPa.)	4,53	8,29	5,34
TCD (MPa.)	3,1	6,63	3,77
MR/TCD	1,46	1,25	1,42



De los datos presentados en la tabla se aprecia que el factor entre el MR/TCD son de 1,46 y 1,25 para el HCP y el FT respectivamente cuando son evaluados independientemente y difieren entre ellos, pero al ser evaluados en conjunto, es decir HCP+FT alcanzan un equilibrio al obtenerse un factor de 1,42, de lo que se puede deducir que quien absorbe los

esfuerzos de tracción por flexión en el HCP+FT cuando la viga es ensayada en posición de moldeo es el HCP en mayor parte, esta posición de ensayo simula los esfuerzos de tracción que se producen cuando una losa de pavimento es cargada en la mitad.

TABLA 6.4 Relación entre el MR/TCD a los 28 días

	HCP	FT	HCP+FT
MR (MPa.)	4,53	8,29	6,57*
TCD (MPa.)	3,1	6,63	3,77
MR/TCD	1,46	1,25	1,74

* MR del HCP+FT obtenido al ensayar la viga en posición invertida a la de moldeo

En la tabla 6.4 se observa que al ser evaluado el HCP+FT en conjunto se obtiene un factor de 1.74 que es mayor que los obtenidos cuando el HCP y el FT son evaluados independientemente, se podría concluir que el HCP y el FT absorben en conjunto los esfuerzos de tracción cuando la viga es ensayada en posición invertida a la de moldeo, esta posición simula los esfuerzos de tracción que se producen en los bordes (esquinas) de una paño de losa.

Adicionalmente se puede mencionar que en caso de no tener vigas aserradas para obtener la resistencia in situ del pavimento de HCP+FT, la información que proporciona el módulo de rotura obtenido de los resultados de los ensayos de tracción por compresión diametral es bastante representativo, ya que al ser incrementado con un factor de 1.4 se obtiene un módulo de rotura de vigas a flexión en posición de moldeo superior a los 4.0 MPa. que generalmente es el módulo de rotura especificado en nuestro país.

6.3.6 Estudio económico de la solución HCP+FT

TABLA 6.5 Presupuesto del diseño HCP+FT (23 cm. espesor)

	Espesor (m)	kg/m ³	lt/m ³	\$/kg	\$/lt	\$/m ³	\$/m ²
HCP							
Cemento IP	0,16	250		0,084		21	3,36
Arena Trit.	0,16	788		0,006		4,58	0,73
Piedra No. 67	0,16	591		0,005		2,96	0,47
Piedra No.7	0,16	591		0,005		2,96	0,47
Aditivo	0,16		2,5		0,45	1,13	0,18
					subtotal	32,61	5,22
FT							
Cemento I	0,07	450		0,075		33,75	2,36
Arena Trit.	0,07	531,3		0,006		3,19	0,22
Arena Nat.	0,07	227,7		0,006		1,37	0,10
Piedra No.67	0,07	355,2		0,005		1,78	0,12
Piedra No.7	0,07	532,8		0,005		2,66	0,19
Aditivo	0,07	5,5		1,25		6,88	0,48
Curador						0,70	0,16
					subtotal	50,32	3,63
					TOTAL	82,93	8,85

El presupuesto presentado en la tabla 6.5 corresponde al diseño de HCP+ FT, para un pavimento con un espesor de 23 cm. utilizando 16 cm. de HCP con 250 kg. de cemento por m³ de hormigón y 7 cm. de FT con 450 kg. de cemento por m³ de hormigón, para el cual se obtiene un costo de 8,85 \$/m².

TABLA 6.6 Precios unitarios para diferentes tipos de pavimentos

Tipos de pavimentos	\$/m ³
Hormigón convencional* vibrado	90,00
HCP**	88,48
Carpeta Asfáltica*	87,04
HCP + FT**	82,93
Base Asfáltica*	80,00
Base Pétreo*	19,30
Subbase Pétreo*	16,80



* Precios unitarios de Enero 2000, ** Precios unitarios de Agosto 2005

Comparando los costos de la tabla 6.6 , es importante señalar que por un costo no superior al de un pavimento equivalente de HCP, se puede construir una vía con HCP+FT con las características requeridas para tráfico y pesado, las cifras demuestran que se pueden construir pavimentos con la combinación HCP+FT, que tengan las mismas características de rodadura que un pavimento de hormigón convencional, con la ventaja de que la apertura al tráfico puede realizarse 48 horas después de su construcción.

Adicionalmente la propuesta HCP+FT tiene la ventaja de que no necesita un mantenimiento ni reparaciones costosas y periódicas que requiere un pavimento asfáltico para tenerlo en óptimas condiciones, incluso el costo inicial de construcción es menor, desvirtuando la creencia de que los pavimentos de hormigón tienen un elevado costo inicial, sin considerar que la economía de un pavimento no debe medirse en función del costo inicial, sino a través del costo del conjunto de obras que se realizan para mantener la vía durante el tiempo de su vida útil.



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la revisión de todo lo expuesto sobre este procedimiento constructivo, experiencias previas en campo y de laboratorio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La ejecución del sistema constructivo HCP+FT es totalmente factible, y se lo ha demostrado a través de tramos de pruebas y obras de carácter oficial, las cuales se encuentran prestando servicio hasta la actualidad en condiciones óptimas.
- Los pavimentos realizados con este sistema tienen las mismas características de acabado y duración que un pavimento rígido convencional, con la ventaja de poder abrirse al tráfico en muy poco tiempo.
- Por su costo representa una alternativa conveniente para desarrollar proyectos viales de tráfico intenso, autopistas y aeropuertos.

- Las propiedades mecánicas evaluadas de manera individual tanto en el HCP como en FT, resistencia a la compresión, tracción y flexión, son altamente satisfactorias, lo cual se vio reflejado y comprobado al momento de evaluar el HCP+FT en conjunto.
- Una adecuada dosificación de agregados, (60% agregado grueso – 40% arena de trituración) en la elaboración del HCP, produce una textura adecuada para desarrollar una adherencia total en la interfase HCP-FT, además que el uso de materiales angulosos provenientes de trituración proporciona una mayor fricción entre agregados que se traduce en un aporte importante para la resistencia del hormigón.
- De la experiencia obtenida en campo y el laboratorio, se puede mencionar que la adherencia HCP+FT también depende del tiempo de colocación entre una capa y otra, el cual debe ser en el menor posible, ya que se debe recalcar que este sistema constructivo NO requiere ligante alguno entre ambas capas.
- Se comprobó mediante estudios analíticos y ensayos destructivos, la total adherencia en la interfase HCP-FT, ya que los esfuerzos generados por el gradiente térmico, y diferencial de retracción no son los suficientemente representativos para provocar desprendimiento entre el HCP y FT, mientras que los ensayos destructivos fueron superados satisfactoriamente a la



rotura sin provocar el más mínimo indicio de desprendimiento o fisuración en la interfase.

- Mediante ensayos de ultrasonido se verificó que el sistema HCP+FT es monolítico, es decir que actúa como un solo elemento; e isótropo, en otras palabras que mantiene sus características constantes en cualquier punto del elemento.

Para lograr los resultados satisfactorios en cuanto adherencia en la interfase HCP-FT obtenidos en la presente investigación, me permito hacer las siguientes recomendaciones al sistema constructivo:

- Como todo sistema constructivo necesita un adecuado control técnico, es por ello que es indispensable que los responsables de la obra tengan un conocimiento cabal del método constructivo, para evitar confundir procedimientos con otros comúnmente utilizados, y seguir las recomendaciones constructivas las cuales son pocas y NO son complejas.
- Elaborar cronogramas de trabajo que garanticen la provisión adecuada de hormigón, a fin de coordinar los trabajos de colocación de las capas de hormigón con el menor desfase posible para evitar problemas de adherencia.



BIBLIOGRAFÍA

ADAM M. NEVILLE, Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

CENTRO TÉCNICO DEL HORMIGÓN, Hormigón Compactado con Pavimentadora (HCP), Serie Monografías n. 013.



DISENSA, Guía de proceso para pavimentos con HCP – Fast Track.

HORMIGÓN FAST TRACK , Reseña Histórica,

<http://www.ramos.utfsm.cl/ociv/hormigon/HORMIGONFASTTRACK.htm>

ING CAMPOSANO LUQUE JOSE A., El Hormigón Compactado con Pavimentadora y el “ Fast Track” trabajando en conjunto para la construcción de autopistas, Centro Técnico del Hormigón, Serie Monografías n.017.

STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE,
Y JUSSARA TANESI, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland
Cement Association.

CIB-ESPOL

ACI 325.1R-01, Accelerated techniques for concrete paving.



ASTM C39/C39M-03, Standard test method for compressive strength
cylindrical concrete specimens.

ASTM C78-02, Standard test method for flexural strength of concrete (using
simple beam with third – point loading).

ASTM C136-01, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse
aggregates.

ASTM C157/C157M-04, Standard test method for length change of hardened
hydraulic – cement mortar and concrete.

ASTM C469-02, Standard test method for static modulus of elasticity and
poisson´s ratio of concrete in compression.



ASTM C496/C496M-04, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete.

ASTM C490-00A, Standard test method for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete.

ASTM C597-02, Standard test method for pulse velocity through concrete.

ASTM C805-02, Standard test method for rebound number of hardened concrete.

ASTM C1435-99, Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer.

ASTM D1557-02, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.



CIB-ESPOL