



Universidad Veracruzana

Instituto de Ingeniería

“Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz”

Tesis de Grado que para obtener el título de Maestro en Ingeniería
Opción Estructuras

Presenta:

Lorena del Carmen Santos Cortés

Director

M.I. José Arturo Hernández Ruiz

Veracruz, Ver.

Septiembre 2006

Universidad Veracruzana

Instituto de Ingeniería Región Veracruz

Boca del Río, Ver

"2006. Año del Bicentenario del natalicio del Benemérito de las Américas.
Don Benito Juárez García"

H. Veracruz, Ver., a 27 de Agosto del 2006
DI584/06

Al Candidato al Grado:
Ing. Lorena Santos Cortés
Presente

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el M.I. José Arturo Hernández Ruiz para que lo desarrolle como tesis, para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería Opción Estructuras

TEMA :

"CONTRIBUCIÓN DE FIBRAS PP PROVENIENTES DE PLÁSTICOS RECICLADOS EN EL AGRIETAMIENTO Y RESISTENCIA DEL CONCRETO EN PAVIMENTOS PORTUARIOS DE VERACRUZ"

- I.- Introducción
 - II.- Usos de las superficies terrestres, portuarias y características de las cargas
 - III.- Dimensionamiento en pavimentos, procedimientos de cálculo y criterios de diseño
 - IV.- Fibras en la construcción, su obtención y estado del arte
 - V.- Contexto de la investigación y planteamiento del problema
 - VI.- Planificación de la investigación
 - VII.- Metodología de la investigación
 - VIII.- Primer ensayo de laboratorio: Características de los materiales en el puerto de Veracruz
 - IX.- Segundo ensayo de laboratorio: Elaboración de concreto con fibras PP
 - X.- Interpretación de resultados: influencia del porcentaje de fibra PP adicionado
 - XI.- Análisis y diseño estructural del pavimento
 - XII.- Modelos matemáticos de simulación de losas sometidas a flexión
 - XIII.- Informe de los resultados
- Conclusiones
Prospectivas de la investigación
Anexos
Glosario
Bibliografía y Referencias

Sin otro particular, me es grato reiterarle la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente
"Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz"

M.I. Alberto P. Lorandi Medina
Director

APLM/apm*

“Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz”

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

Lorena del Carmen Santos Cortés



Tesis de Grado presentada al Instituto de Ingeniería de la
Universidad Veracruzana

Este trabajo es un tributo a mis padres:

DOLORES CORTÉS SILVERIO

RUBEN SANTOS CRUZ

Por el gran cariño y respeto que les profeso y porque dios no me pudo premiar con unos padres mejores. A ellos debo el haber finalizado este trabajo, pues gracias a su apoyo y consejos pude concluir un camino lleno de imprevistos.

Con cariño a mi amiga:

BLANCA LISSETH MORA GARCÍA

Porque los años de convivencia a nivel profesional y personal nos han unido mas cada día, gracias por las continuas muestras de ánimo y por demostrarme que la amistad es la tranquilidad de saber que no debes nada a cambio, sino compartir tanto los buenos como los malos momentos.

En memoria de mi tío:

JESÚS CORTÉS SILVERIO (Q.E.P.D)

De quien guardo un gran recuerdo porque a su lado pase muchos de los mejores momentos de mi niñez, de quien siempre recibí apoyo, cariño, respeto y el mejor trato que una persona sea capaz de dar; enseñándome que en la vida uno es más valioso conforme crece como persona.

A Dios nuestro Señor:

Gracias por permitirme concluir este trabajo.

Agradecimientos

Desde estas líneas quiero dar las gracias tanto a las personas como instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis. A todos ellos les debo el apoyo brindado, ya que sin su apreciable ayuda profesional no habría sido posible la terminación de este trabajo.

A mi director de tesis, el M.I. José Arturo Hernández Ruiz gracias por la confianza que ha depositado en mí, por su paciencia y buen trato, ya que sin sus ideas esta tesis no habría sido posible.

Debo hacer mención a mi tutor, el Dr. Peña Pardo por la ayuda y el apoyo otorgado en todo momento desde el inicio hasta el término de la maestría, por sus consejos, correcciones y por estar siempre pendiente de mi trayectoria como estudiante.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, por la disposición y facilidades otorgadas, principalmente al Sr. Ernesto Figueroa, Jefe del laboratorio de materiales, por su interés, dedicación y por la gran ayuda técnica brindada en la realización de las pruebas de concreto, sacrificando incluso su periodo de vacaciones para apoyarme, ya que gracias a sus sugerencias pude concluir satisfactoriamente este trabajo.

A mis colegas y compañeros de trabajo diario durante todo o parte del tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo de investigación, por su comprensión y facilidades para acomodar convenientemente mi jornada profesional, especialmente a Tere, gracias por la invaluable ayuda y la paciencia otorgada a lo largo de todo el tiempo que me llevó la realización de este trabajo.

A cuantas personas he citado cuento entre mis amistades. Algunas ya lo eran con anterioridad; las demás han pasado a honrarme con tal condición con ocasión de la relación establecida por este trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer la compañía de mis familiares y amigos durante estos años, a quienes he escatimado últimamente mi atención, aunque no mi consideración y mi estima, por comprender y confiar en mis prioridades profesionales, respondiendo siempre con su respaldo en todo lo que he necesitado.

A todos ustedes muchas gracias.

L. Santos
Septiembre, 2006

Resumen

El estudio contempla la evaluación comparativa de las propiedades mecánicas y físicas del concreto, reforzado con materiales no convencionales como son las fibras PP, para su aplicación en pavimentos portuarios.

Con los datos obtenidos en el laboratorio se define un modelo de simulación numérico empleando un software, que tiene como base de diseño el método de PCA.

Se incluyen aplicaciones numéricas en 3D para un pavimento sometido a cargas de fatiga y tránsito de equipo portuario. El análisis estructural del pavimento se calcula considerando al sistema estructural como un conjunto de losas de concreto sometido a condiciones externas (cargas actuantes, suelo de apoyo y tipo de tráfico).

Mediante los modelos de simulación con el software RAM Advance, se representa un pavimento sometido a dos tipos de tráfico: pesado y ligero, comparando sus resultados para analizar la posibilidad de sustituir la malla electrosoldada por el porcentaje óptimo de fibras PP obtenido previamente en el laboratorio.

La investigación busca mejorar las características del concreto mediante la adición de fibras PP, obteniendo una mezcla económica y durable para aplicarlas a pavimentos. Las fibras de acero son una alternativa viable pero más costosa.

Las fibras sintéticas como el PP obtenidas a través del reciclaje de desechos plásticos pueden ser una posible solución ya que la materia prima es abundante y al mismo solucionar problemas de tipo ambiental.

Las conclusiones obtenidas son aplicables a los materiales y condiciones particulares del Puerto de Veracruz, sin embargo, la metodología se puede generalizar a cualquier caso dentro del país, e inclusive incursionar dentro de los pavimentos en caminos u otras aplicaciones.

Abstract

This study contemplates the comparative evaluation of the mechanical and physical properties of nonconventional materials –like PP fibers- reinforced concrete for its application in harbor pavements.

With the data collected in the laboratory it is tried to define a numerical model of simulation through a software, having as design base the PCA method.

Numerical applications in 3D for a pavement submissive fatigue loads and transit of harbor equipment are included. The structural analysis of the pavement has made considering to the structural system as a slab set of concrete put under external conditions (operating loads, ground of support and type of traffic).

By means of the models of simulation with RAM Advanse software, a pavement submissive two types of traffic imagines: heavy and light, comparing its results to analyze the possibility of replacing the mesh electro-welded by the optimal percentage of fibers PP previously obtained in the laboratory.

The research is directed to improve the characteristics of concrete by means of the PP fiber addition, obtaining an economic and durable mixture to apply them to pavements. The steel fibers are a viable but more expensive alternative.

The synthetic fibers like the PP obtained through the recycling of plastic remainders can be a possible solution since the source of its obtaining is in great amounts and at the same time, it can face problems of environmental type.

The obtained conclusions are according to the materials and particular conditions of the Port of Veracruz, nevertheless, the methodology can be generalized to any case within the country, and inclusively be applied within the pavements in roads or other applications.

Palabras claves

Modelos de simulación, concreto, refuerzo, concreto fibroreforzado, fibras PP, compresión simple, tensión indirecta, flexión y módulo de rotura



Índice

	Página
Tabla de abreviaturas	xiii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tablas	xvi
Lista de Imágenes	xviii
Lista de Cuadros	xx
Notas para el lector	xxi
INTRODUCCIÓN	1
Justificación	3
Estructura de la tesis	4
PRIMERA PARTE. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
CAPÍTULO 1. USOS DE LAS SUPERFICIES TERRESTRES PORTUARIAS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS	7
1.1 Clasificación de las superficies terrestres portuarias	8
1.2 Características de las cargas en las superficies portuarias	13
1.3 Periodo de diseño	24
1.4 Categorías de tráfico	24
CAPÍTULO 2. DIMENSIONAMIENTO EN PAVIMENTOS, PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO Y CRITERIOS DE DISEÑO	26
2.1 Criterios de diseño para el concreto en pavimentos	27
2.2 Métodos de dimensionamiento	29
2.3 Método PCA	32
2.4 Tipos de juntas, distribución, y dimensionamiento	39
2.5 Determinación del acero de refuerzo	42
CAPÍTULO 3. FIBRAS EN LA CONSTRUCCIÓN, SU OBTENCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	44
3.1 Descripción de las fibras	45
3.2 Clasificación de las fibras	45
3.3 Fibras naturales	48
3.4 Aplicaciones de Fibras Sintéticas ⁹	50
3.5 Obtención de Fibras Sintéticas a partir de plásticos reciclados	51

3.6 Estado del arte de la temática que se propone	53
3.7 Originalidad del proyecto	55
3.8 Limitación de responsabilidades	57
SEGUNDA PARTE. PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	58
CAPÍTULO 4. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	59
4.1 El contexto en el Puerto de Veracruz	60
4.2 Planteamiento del problema	63
4.3 Enfoque de ambos problemas	71
4.4 Alcances de la investigación	74
CAPÍTULO 5. PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	75
5.1 Objetivos de la investigación	76
5.2 Tipo de investigación	77
5.3 Diseño de la investigación	81
CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	103
6.1 Planteamiento de la hipótesis	104
6.2 Metodología General	104
6.3 Definición y establecimiento de los elementos de análisis	106
6.4 Variables de estudio	111
6.5 Definición conceptual de las variables de estudio	113
6.6 Definición conceptual de las variables del estudio en los modelos de simulación	115
6.7 Indicadores e índices	117
6.8 Clasificación de las variables de análisis	118
6.9 Estrategia metodológica	119
6.10 Técnica de recolección de datos	122
6.11 Procedimiento de investigación. Trabajo de laboratorio	124
6.12 Análisis de los datos	136
6.13 Modelo de evaluación estructural. Trabajo de gabinete	142
CAPÍTULO 7. PRIMER ENSAYO DE LABORATORIO. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN EL PUERTO DE VERACRUZ	150
7.1 Características del cemento	151
7.2 Características de las fibras PP	152
7.3 Agua	152
7.4 Características de la arena	153
7.5 Características de la grava	163

CAPÍTULO 8. SEGUNDO ENSAYO DE LABORATORIO. ELABORACIÓN DE CONCRETO CON FIBRAS PP	173
8.1. Dosificaciones de las mezclas	176
8.2. Pruebas del concreto fresco	181
8.3. Fabricación de los especímenes de ensayo	185
8.4. Características de los equipos de laboratorio	191
8.5. Descripción de los ensayos	192
CAPÍTULO 9. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS: INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA PP ADICIONADO	201
9.1 Comportamiento de las fibras PP en el concreto	202
9.2 Análisis de las variables dependientes	203
9.3 Análisis del comportamiento del concreto en función de la variable independiente... ..	216
9.4 Obtención de la cantidad óptima de fibras PP para el diseño de un pavimento portuario	221
CAPÍTULO 10. ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO	223
10.1 Datos de diseño	224
10.2 Análisis del tráfico para conocer el número de repeticiones por eje	225
10.3 Cálculo del módulo de sub-reacción (K) de diseño	226
10.4 Cálculo del espesor del pavimento	226
10.5 Resultados	227
10.6 Cálculo del acero de refuerzo	227
CAPÍTULO 11. MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULACIÓN DE LOSAS SOMETIDAS A FLEXIÓN	229
11.1. Generalidades	230
11.2. Consideraciones básicas del Método del PCA	231
11.3. Modelación del sistema	233
11.4. Uso de la superficie y análisis de cargas	235
11.5. Análisis Estructural	238
11.6. Diseño estructural tradicional	245
11.7. Análisis de sustitución del acero por fibras PP	248
3ra PARTE. INFORME DE LOS RESULTADOS, CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA DE LA INVESTIGACIÓN	253
CAPÍTULO 12. INFORME DE LOS RESULTADOS	254
12.1. Sustitución de la malla electrosoldada	256
12.2. Control del fisuramiento en losas de concreto	258

CAPÍTULO 13. CONCLUSIONES	261
13.1 Beneficios técnicos de las fibras PP en el concreto	262
13.2 Beneficios económicos de pavimentos reforzados con fibras PP.....	268
13.3 Otras aplicaciones del concreto con fibras PP	269
13.4 Evaluación de los modelos de simulación.....	270
CAPÍTULO 14. PROSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN	271
ANEXOS	275
Anexo 1. Elementos que componen un firme portuario.....	276
Anexo 2. Tablas de diseño de la PCA.....	282
Anexo 3. Porcentaje del TPDA para cada tipo de camión.....	291
Anexo 4. Normas de ensayo a las que se hace referencia en la investigación.....	293
Anexo 5. Recomendaciones del IMCYC para concretos fibroreforzados.....	295
Anexo 6. Resultados de las corridas estructurales.....	299
GLOSARIO	311
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	313
Bibliografía y Referencias.....	314
1. Bibliografía.....	314
2. Referencias.....	315

Tabla de abreviaturas

Abreviatura

m
T - 20
t
Kg
grs

Significado

Metro
Type 20
Tonelada
Kilogramos
Gramos



Lista de Figuras

Figuras	Página
1.1. Clasificación de un puerto por usos	8
1.2. Clasificación de un puerto por zonas	9
1.3. Clasificación de las zonas de almacenamiento	10
1.4. Clasificación de las vías de comunicación	12
1.5. Proporción de vehículos circulando por el carril de baja velocidad en 2 o 3 carriles	23
2.1. Juntas de expansión	39
2.2. Juntas longitudinales	40
2.3. Juntas transversales de contracción	40
3.1. Clasificación de las fibras	46
3.2. Clasificación de los plásticos más comunes	51
4.1. Localización del Puerto de Veracruz	60
4.2. Causas que originan el agrietamiento del concreto	64
4.3. Grietas por asentamiento plástico	65
4.4. Grietas por contracción plástica	65
4.5. Clasificación de las grietas por su profundidad	71
4.6. Clasificación de las grietas por su dirección	72
4.7. Problemática de la investigación	73
5.1. Proceso de conceptualización del problema	78
5.2. Proceso de diseño de la investigación	81
5.3. Instrumentos para recolección de datos	91
5.4. Pasos en el diseño de una mezcla en el Método de Pesos y Volúmenes	92
5.5. Proceso de la prueba de revenimiento	95
5.6. Distribución del esfuerzo horizontal en un cilindro sometido a tensión indirecta	96
5.7. Aplicación de carga de flexión en los tercios de la viga	99
6.1. Combinación de metodologías	104
6.2. Pasos para la aplicación de la metodología	106
6.3. Aplicación de la estrategia de "Combinación" en la Investigación	120
6.4. Aplicación de la estrategia de "Triangulación" en la Investigación	121
6.5. Representación gráfica de la estrategia metodológica de la Investigación	121
6.6. Técnica de recolección de datos y objetivos buscados	123
6.7. Diseño del marco de la investigación	125
6.8. Gráficas de arenas para concreto	137
6.9. Gráficas de gravas para concreto	137
6.10. Esquema de la medida de los resultados mediante pruebas de laboratorio	146
6.11. Secuencia del análisis estructural del pavimento	147
6.12. Proceso de elaboración del modelo de simulación	149
7.1. Granulometría de la arena analizada	159
7.2. Granulometría de la grava analizada	168
8.1. Proporción aproximada de una mezcla de concreto	174
8.2. Elementos que componen un concreto normal	175
8.3. Elementos que componen un concreto fibroreforzado	175
8.4. Molde para prueba de revenimiento	182
9.1. Interpretación de los resultados de la investigación	202
9.2. Trabajabilidad de las mezclas de concreto	204

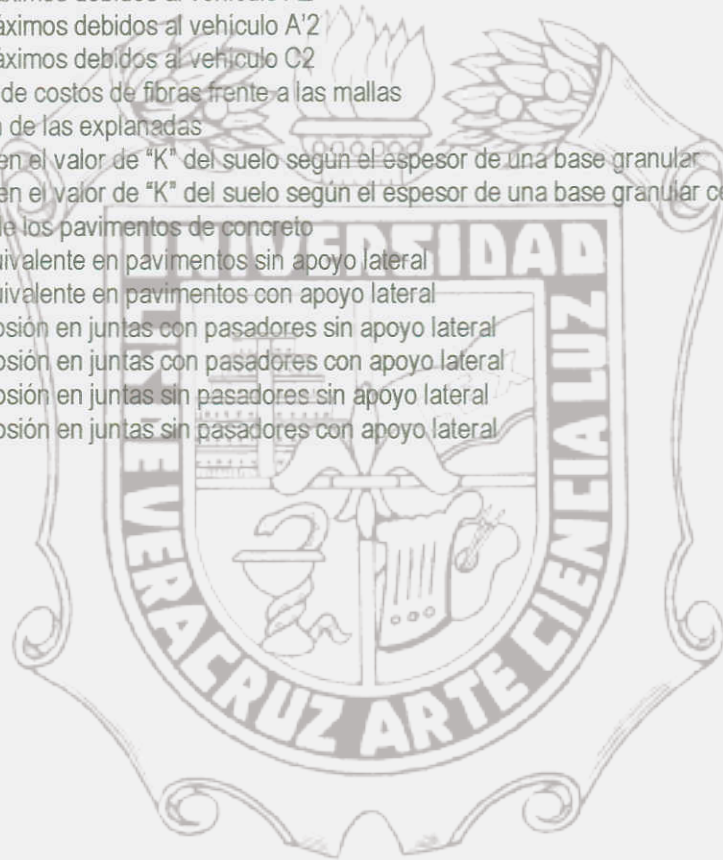
9.3. Variación del asentamiento en función del porcentaje PP	205
9.4. Resistencia a la compresión a los 7 días	206
9.5. Resistencia a la compresión a los 14 días	207
9.6. Resistencia a la compresión a los 28 días	209
9.7. Evolución de la resistencia a la compresión con la edad	210
9.8. Resistencia a la tensión indirecta a los 7 días	212
9.9. Resistencia a la tensión indirecta a los 14 días	213
9.10. Resistencia a la tensión indirecta a los 28 días	214
9.11. Evolución de la resistencia a la tensión indirecta con la edad	215
9.12. Resistencia a la flexión a los 28 días	216
10.1. Características del vehículo de diseño	224
11.1. Posición de las cargas que provocan los esfuerzos críticos	232
11.2 Posición de las cargas que provocan las deformaciones críticas	232
11.3 Elemento placa usado por el RAM Advanse	233
11.4 Modulación de losas	235
11.5 Cargas en vehículos de diseño de tráfico ligero	236
11.6 Cargas en vehículos de diseño de tráfico pesado	237
11.7 Modelo del suelo	240
11.8 Elementos placa en el modelo	241
11.9 Modelo que incluye juntas y pasadores	242
11.10 Carga viva en vehículo A2	242
11.11 Carga viva en vehículo A'2	243
11.12 Carga viva en vehículo C2	244
11.13 Momentos máximos debidos al vehículo A2	246
11.14 Momentos máximos debidos al vehículo A'2	247
11.15 Momentos máximos debidos al vehículo C2	248
A1.1. Sección típica de un firme portuario	277
A1.2. Relación entre el CBR y el módulo "K"	279
A2.1. Método del PCA (1984). Análisis por fatiga	288
A2.2. Método del PCA (1984). Análisis por erosión con apoyo lateral	289
A2.3. Método del PCA (1984). Análisis por erosión sin apoyo lateral	290



Lista de Tablas

Tabla	Página
1.1. Clasificación de las cargas de diseño	16
1.2. Categorías de tráfico	25
2.1. Formato para el cálculo del espesor de pavimentos	37
2.2. Espaciamientos mínimos en barras de unión	41
2.3. Espaciamientos mínimos en pasajuntas	42
2.4. Presentaciones de la malla electrosoldada	43
3.1. Clasificación de los plásticos	53
5.1. Fuentes bibliográficas utilizadas	84
5.2. Resumen del método y material utilizado en la investigación	86
5.3. Resumen de la estrategia metodológica	87
5.4. Pruebas a realizar en los especímenes	95
5.5. Resumen del diseño de la investigación	101
6.1. Formato para el registro de la muestra del estudio cualitativo	108
6.2. Muestra del estudio cuantitativo (1ra fase) en sus dos colectivos	109
6.3. Distribución de la población de cilindros	109
6.4. Distribución de la población de vigas	110
6.5. Muestra del estudio cuantitativo (2da fase)	110
6.6. Clasificación de las variables de análisis	119
6.7. Estrategia metodológica de "Complementación"	120
6.8. Calendario de ejecución de ensayos de concreto	129
6.9. Recursos humanos utilizados en los trabajos de laboratorio	130
6.10. Clasificación de la arena por su módulo de finura	137
6.11. Formato resumen de las características de los agregados pétreos	139
6.12. Tabulación de los datos de ensayos de resistencia a la compresión del concreto	141
6.13. Formato de presentación de los resultados del análisis estructural	147
7.1. Propiedades de las fibras de polipropileno	152
7.2. Análisis granulométrico de la arena	158
7.3. Análisis granulométrico de la arena	167
8.1. Características de los materiales	176
8.2. Parámetros de diseño	176
8.3. Proporcionamiento del concreto patrón en peso por 1 m ³	177
8.4. Tipos de concreto a ensayar	178
8.5. Identificación de los colados para el concreto C-250	181
8.6. Resultados de los ensayos de trabajabilidad	185
8.7. Probetas de ensayo para cada tipo de muestra	187
8.8. Tipos de compactación recomendados	187
8.9. Identificación de los especímenes de ensayo	189
9.1. Comparación en la trabajabilidad de las mezclas	204
9.2. Resumen de la resistencia a la compresión a los 7 días	206
9.3. Resumen de la resistencia a la compresión a los 14 días	207
9.4. Resumen de la resistencia a la compresión a los 28 días	208
9.5. Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a los 7 días	210

9.6 Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a los 14 días	212
9.7 Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a los 28 días	213
9.8 Resumen de la resistencia a la flexión a los 28 días	215
10.1 Tránsito promedio diario	225
10.2 Número de repeticiones por vehículo	226
10.3 Diseño del pavimento por el método del PCA	227
11.1 Tipos de vehículos de diseño	236
11.2 Momentos máximos en pavimento con vehículo A2	245
11.3 Momentos máximos en pavimento con vehículo A'2	246
11.4 Momentos máximos en pavimento con vehículo C2	247
11.5 Esfuerzos máximos debidos al vehículo A2	249
11.6 Esfuerzos máximos debidos al vehículo A'2	250
11.7 Esfuerzos máximos debidos al vehículo C2	250
13.1 Comparativo de costos de fibras frente a las mallas	268
A1.1. Clasificación de las explanadas	278
A1.2. Incremento en el valor de "K" del suelo según el espesor de una base granular	280
A1.3. Incremento en el valor de "K" del suelo según el espesor de una base granular cementada	281
A1.4. Espesores de los pavimentos de concreto	281
A2.1 Esfuerzo equivalente en pavimentos sin apoyo lateral	282
A2.2 Esfuerzo equivalente en pavimentos con apoyo lateral	283
A2.3 Factor de erosión en juntas con pasadores sin apoyo lateral	284
A2.4 Factor de erosión en juntas con pasadores con apoyo lateral	285
A2.5 Factor de erosión en juntas sin pasadores sin apoyo lateral	286
A2.6 Factor de erosión en juntas sin pasadores con apoyo lateral	287



Lista de Imágenes

Imágenes	Página
1.1. Vista aérea del puerto de Veracruz	9
1.2. Zonificación de un puerto	10
1.3. Clasificación de las zonas de almacenamiento	11
1.4. Vías de acceso	13
1.5. Zonas complementarias	13
1.6. Isotanques	15
1.7. Clasificación de grúas	18
1.8. Grúas RTG's	19
1.9. Staddle Carries	19
1.10. Cargadores frontales	20
1.11. Cargadores laterales	21
3.1. Fibras de polipropileno	51
4.1. El puerto de Veracruz	60
4.2. Zona hotelera del puerto	61
4.3. Carreteras y accesos	61
4.4. Zona portuaria	62
4.5. Malecón	62
4.6. Vista general del puerto de Veracruz	67
4.7. Estructuras de concreto cercanas al malecón	67
4.8. Agrietamientos debidos a los altos índices de salitre	68
4.9. Deterioro de las estructuras de concreto en el interior de la zona portuaria	69
4.10. Exposición del acero de refuerzo debido al salitre	69
7.1. Determinación del PVSS de la arena	154
7.2. Cernido de la arena	156
7.3. Granulometría de la arena	157
7.4. Equipo en prueba de densidad	159
7.5. Prueba de densidad de la arena	160
7.6. Secado de la muestra	162
7.7. Proceso de lavado de la grava	164
7.8. Determinación del PVSV de la grava	165
7.9. Granulometría de la grava	167
7.10. Proceso de lavado y saturación del agregado grueso	169
7.11. Prueba de absorción del agregado grueso	170
7.12. Prueba de densidad del agregado grueso	172
8.1. Peso y homogenización de los materiales	178
8.2. Fabricación de la mezcla	179
8.3. Adición de fibras PP	180
8.4. Prueba de revenimiento	183
8.5. Asentamiento del cono	184
8.6. Fabricación de cilindros	186
8.7. Fabricación de vigas	186
8.8. Compactación de especímenes	188

8.9. Terminación superficial de especímenes	189
8.10. Desmolde de especímenes	190
8.11. Identificación y curado de especímenes	190
8.12. Equipo del laboratorio de materiales	191
8.13. Prueba de compresión	193
8.14. Prueba de tensión indirecta	196
8.15. Preparaciones para la prueba de flexión	199
8.16. Prueba de flexión	199
9.1. Ensayo a tensión indirecta a 7 días	211
9.2. Exudación en la fabricación de especímenes	217
9.3. Adherencia entre concreto y fibras	218
9.4. Exceso de poros en la muestra CF3	219
9.5. Ensayo a tensión indirecta a 14 días	220
9.6. Ensayo a tensión indirecta a 28 días	221
13.1. Comportamiento de especímenes en ensayo a compresión	265
13.2. Comportamiento de especímenes en ensayo a tensión indirecta	266



Lista de Cuadros

Cuadro	Página
6.1. Distribución temporal de las fases que constituyen el 1er trabajo de laboratorio (Estudio Cualitativo)	128
6.2. Distribución temporal de las fases que constituyen el 2do trabajo de laboratorio (Estudio Cuantitativo 1ra fase)	128
6.3. Aspectos a considerar en la revisión de la investigación	148



Notas para el lector

Normas de Ensayo

Las normas de ensayos mencionadas son, en general, las normas de la Sociedad Norteamericana de Ensayos y Materiales (ASTM). En el texto, las normas están designadas por números únicamente. El título completo de cada norma a la que se hace referencia se encuentra en el anexo 4. Salvo que se indique lo contrario, las referencias a las normas corresponden a la última versión.

Acrónimos

En la tesis se usan los siguientes acrónimos de organizaciones:

ACI: American Concrete Institute

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Society For Testing and Materials

RDF: Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal

NTC: Normas Técnicas Complementarias

ICAWE: Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz





Los pavimentos de concreto son ampliamente usados en las zonas portuarias gracias a sus características de duración y calidad presentes en el material, cuya resistencia se ha venido mejorando a través del tiempo con el empleo del refuerzo.

A pesar de que presentan gran variedad de aspectos favorables como son poco mantenimiento y mayor vida útil, también cuentan con rasgos negativos, como es la tendencia del concreto a agrietarse cuando su baja resistencia a la tensión es superada por los esfuerzos generados.

El tipo más común de grietas aparece en estado plástico al atravesar el concreto por el proceso de deshidratación, generando una pérdida de volumen, lo que origina la formación de grietas, las cuales se forman dentro de las primeras seis horas posteriores a la colocación del concreto, con lo cual la estructura se vuelve vulnerable a factores ambientales como la humedad, la erosión, la temperatura y la corrosión del acero de refuerzo.

En el caso de los pavimentos, como la superficie expuesta a esta acción es mayor, por lo general, las grietas debidas a la retracción plástica cruzan toda la losa antes de que el concreto tenga la oportunidad de obtener la resistencia de diseño.

En los concretos reforzados con acero, una vez que la grieta ocurre, este o la malla electrosoldada, asumen la carga total de tensión para la masa completa, pero la grieta deja claramente expuesto el acero a las condiciones ambientales críticas mencionadas anteriormente.

Esto representa un grave problema principalmente en zonas cercanas al mar donde los efectos del salitre provocan graves deterioros a todo tipo de estructuras.

Esta investigación busca mejorar la tecnología desarrollada para el diseño de concreto, en cuanto a sus propiedades mecánicas, mediante la adición de fibras de polipropileno (fibras PP). Una vez obtenida la dosificación necesaria de fibras, lo siguiente es evaluar su viabilidad y comportamiento en pavimentos portuarios; en particular en el Puerto de Veracruz, empleando así un nuevo concepto denominado "Concretos Fibroreforzados".

Los ingredientes básicos del concreto son agregados pétreos, cemento y agua; en el caso de los concretos fibroreforzados, estos contienen una adición de fibras la cuales pueden ser naturales o sintéticas.

La investigación inicia con las pruebas de laboratorio, las cuales se dividen en dos grupos:

- Pruebas de los agregados
- Pruebas de concreto

Con ellas, se busca sustentar el comportamiento del concreto hidráulico reforzado con fibras PP para la formulación de recomendaciones de diseño en pavimentos para el caso específico del Puerto de

¹ A lo largo del documento al hacer referencia a las fibras de polipropileno, se utilizará en algunos casos la abreviatura PP.

Introducción

Veracruz, con base a los resultados obtenidos y a las experiencias de diversos países donde este tipo de fibras ya se aplican a otras estructuras de ingeniería.

Además, como este tipo de fibras sintéticas se pueden obtener del reciclaje de plásticos, y observando las nuevas tendencias ambientalistas en las cuales se requiere la fabricación de productos que no causen efectos negativos al medio ambiente, se busca el aprovechamiento de los residuos que sean potencialmente reciclables.

Por lo tanto, se desea mejorar un material tradicional como el concreto y al mismo tiempo se trata de hacer conciencia sobre el aprovechamiento de las grandes cantidades de residuos plásticos que se generan diariamente; lo que aplicado a la ingeniería se traduce como mejorar los materiales existentes o buscar nuevas opciones que sean más económicas que las que actualmente se emplean.

Con esto se busca obtener una buena compatibilidad entre elementos naturales y sintéticos, lo cual puede ser un claro avance a nivel constructivo.

Finalmente para tener una aproximación del comportamiento de este nuevo refuerzo a base de fibras sintéticas en los pavimentos portuarios, se realizará un análisis a partir de modelos de simulación de losas.

Justificación

Actualmente los problemas de agrietamiento, y como consecuencia los de corrosión del acero de refuerzo en las estructuras del puerto de Veracruz, son severos. Esto provoca daños a las estructuras, a las que se tiene que dar un constante mantenimiento.

Esta situación exige día con día desarrollar nuevos materiales y si con ello se logra al mismo tiempo una reducción en los costos, el impacto puede ser importante.

A pesar de que ya se han reportado algunos beneficios respecto a las mejoras en las propiedades mecánicas en concretos reforzados con fibras metálicas y fibras de carbono, todavía hace falta mucho por hacer, ya que en países en vías de desarrollo esta puede ser una respuesta a los requerimientos tanto técnicos como económicos.

Si en conjunto se plantea una posible solución de qué hacer con los grandes volúmenes de basura y residuos de plásticos generados en el puerto de Veracruz y en las principales ciudades del mundo, se hace evidente la importancia de este proyecto.

Esta tarea queda en manos de los Centros de Estudios Superiores, siendo uno de ellos el Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, donde a través de las maestrías en las diferentes ramas de la Ingeniería que aquí se ofrecen, tanto alumnos como catedráticos buscan desarrollar mediante sus propuestas de tesis, soluciones a los problemas que afectan a la sociedad Veracruzana, como lo es el ámbito del presente proyecto de tipo estructural.

Introducción

Con este trabajo se pretende resolver problemas estructurales en condiciones ambientales agresivas, y al mismo tiempo encontrar una aplicación para los productos obtenidos a partir del reciclaje, empleándolos para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de materiales clásicos como el concreto.

Por medio de los objetivos planteados en el capítulo 5, se pretende encontrar resultados valiosos tanto técnicos como económicos, al conocer el comportamiento del concreto hidráulico con fibras PP bajo cargas de flexión, tensión y compresión empleando los criterios de diseño de la PCA y las normas ASTM.

La finalidad es determinar las ventajas y desventajas, en base a los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio de los concretos fibroreforzados evaluar la factibilidad de su aplicación en pavimentos dentro de la zona portuaria, y así analizar la posibilidad de sustituir, total o parcialmente, la malla electrosoldada empleada actualmente por fibras sintéticas de polipropileno.

La investigación es una aportación al mejoramiento de los materiales empleados en México, que busca resolver los problemas que afectan a las estructuras y al mismo tiempo reducir costos, mediante el empleo de materiales obtenidos del reciclaje.

El estudio se ha centrado en los pavimentos portuarios por dos razones:

- 1.- Por considerar que el deterioro de las estructuras en las zonas cercanas al mar es mayor debido a los efectos del salitre.
- 2.- Porque mi actual situación laboral consiste en la elaboración de todo tipo de proyectos para diferentes puertos México y el extranjero. Este hecho garantiza un ámbito de aplicación directo de los resultados de la investigación, ya que los conocimientos adquiridos de este trabajo pueden tener aplicación a los proyectos que realizo.

Estructura de la tesis

El documento que se presenta a continuación, se estructura en tres partes claramente diferenciadas:

- La primera trata de fundamentar teórica y conceptualmente, el objeto de estudio. De esta forma, a partir de una revisión bibliográfica, se ofrece una breve síntesis sobre el uso de las superficies portuarias y las condiciones de carga más comúnmente impuestas sobre los pavimentos de estas zonas.

Adicionalmente, se esquematizan los principales componentes de un pavimento portuario, así como algunos criterios a considerar para su dimensionamiento, tomando en cuenta algunos rasgos característicos que prevalecen durante el deterioro por corrosión ocasionado por el salitre.

Se incluye también la clasificación de las fibras, la aplicación de las fibras sintéticas en diversos países en las mezclas de concreto y su obtención a partir de plásticos reciclados. Buscando crear conciencia para el reciclaje de desechos plásticos resaltando la factibilidad de su uso.

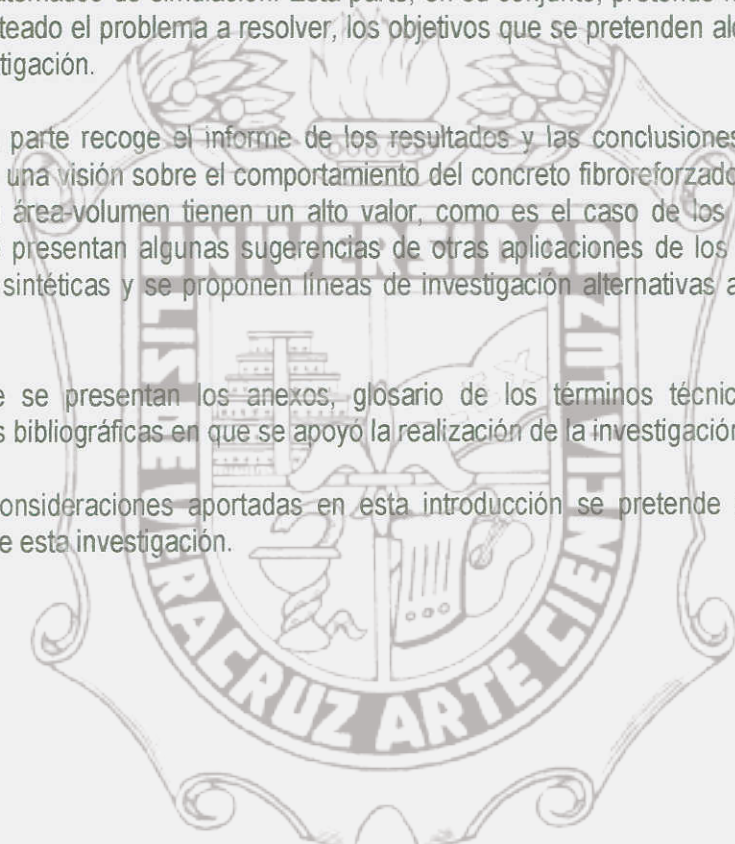
- La segunda parte presenta el contexto de la investigación, definiendo las circunstancias específicas de la adición de las fibras PP al concreto.

También se menciona, el diseño y planificación del estudio; y además, la metodología para la ejecución de los trabajos de laboratorio, finalizando este apartado con la presentación del modelo matemático de simulación. Esta parte, en su conjunto, pretende mostrar al lector como se ha planteado el problema a resolver, los objetivos que se pretenden alcanzar y la secuencia de la investigación.

- La tercera parte recoge el informe de los resultados y las conclusiones de la investigación, ofreciendo una visión sobre el comportamiento del concreto fibroreforzado en elementos donde la relación área-volumen tienen un alto valor, como es el caso de los pavimentos. Junto al informe se presentan algunas sugerencias de otras aplicaciones de los concretos reforzados con fibras sintéticas y se proponen líneas de investigación alternativas al problema objeto de estudio.

Finalmente se presentan los anexos, glosario de los términos técnicos empleados y las referencias bibliográficas en que se apoyó la realización de la investigación.

Con las consideraciones aportadas en esta introducción se pretende situar al lector en el contexto de esta investigación.





PRIMERA PARTE. FUNDAMENTOS TEÓRICOS
DE LA INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 1 USOS DE LAS SUPERFICIES TERRESTRES PORTUARIAS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS

El objetivo de este capítulo es presentar una clasificación de las diversas zonas en el interior de un puerto a efectos de pavimentación, intentando relacionar entre sí los factores que intervienen en el diseño de pavimentos.

Toda superficie de apoyo para el almacenamiento de mercancías debe ser segura, cómoda, duradera y económica para dicho almacenamiento.

No se pretende hacer una explicación detallada de cada una de las superficies, ya que no es el objeto del estudio, sin embargo, es conveniente para ubicar al lector que no esté relacionado con zonas portuarias sobre la importancia en la zonificación terrestre en el interior de un puerto, indicando el uso de cada una de ellas.

1.1 Clasificación de las superficies terrestres portuarias

En general las superficies terrestres en un puerto se les pueden clasificar atendiendo a dos grandes grupos:¹

- a. Por usos
- b. Por zonas

1.1.1 Por usos

En la Figura 1.1 se representan esquemáticamente las 5 subdivisiones:

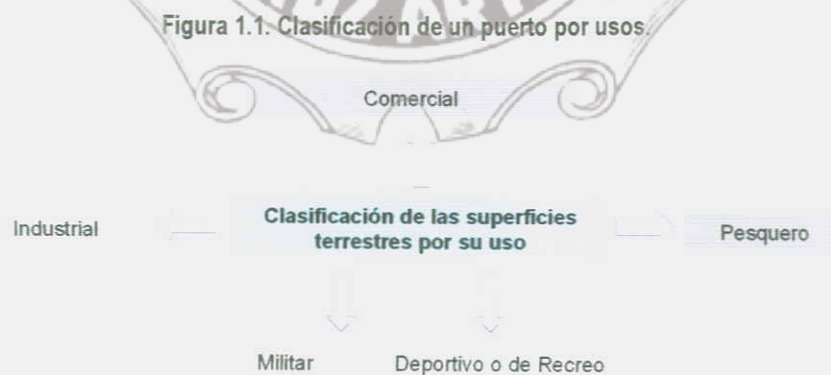


Figura 1.1. Clasificación de un puerto por usos.

Dentro de esta clasificación, el puerto de Veracruz está considerado como cien por ciento comercial, por ser el principal puerto a nivel nacional. Su excelente ubicación estratégica con 60 millones de consumidores potenciales en su zona de influencia, lo constituyen como uno de los puntos más importantes para el abasto de graneles y productos industriales para los principales centros productivos y comerciales del país.²

El puerto de Veracruz a través de la Administración Portuaria Integral (APIVER), está dedicado a las actividades portuarias de intercambio entre los modos del transporte terrestre y marítimo, en cuanto al manejo y almacenamiento de mercancías con la finalidad de comercio, ofreciendo sus servicios a las líneas navieras a nivel tanto nacional como internacional.

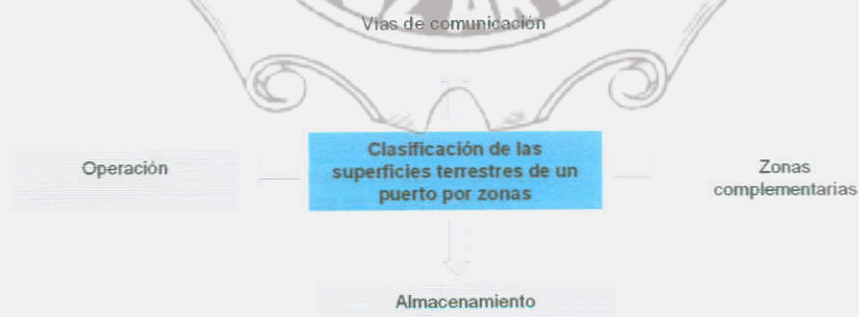


Imagen 1.1. Vista aérea del puerto de Veracruz.

1.1.2. Por zonas

Dentro de un puerto se suelen distinguir 3 zonas principales, más una zona adicional (vías de comunicación), en función de las actividades que en ellas se realizan. En esta segunda clasificación, de acuerdo a la Figura 1.2, se consideran cuatro subdivisiones:

Figura 1.2. Clasificación de un puerto por zonas.



De forma introductoria y a modo de síntesis, se presenta a continuación la descripción de cada una de ellas.

1.1.2.1 Zonas de operación¹

Son aquellas que se han destinado para la transferencia y manipulación de mercancías, materiales o suministros, donde es posible realizar un almacenamiento transitorio de la misma.

Para efectos de pavimentación se consideran las condiciones más desfavorables, como cuando hay equipos para el traslado de mercancías de un lugar a otro dentro del puerto, tanto los de circulación restringida (neumáticos sobre roderas y equipos sobre carriles, incluyendo los vagones ferroviarios), como los de circulación no restringida (sobre neumáticos o sobre orugas).



a. Zonas de operación

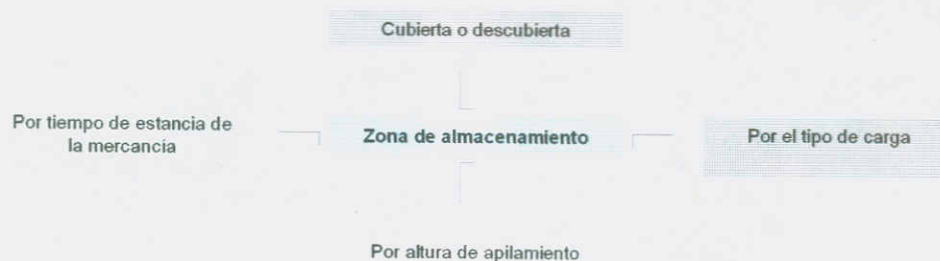
b. Zonas de almacenamiento

Imagen 1.2 Zonificación en un puerto.

1.1.2.2 Zonas de almacenamiento¹

Son zonas destinadas a la permanencia durante días de la mercancía. Su clasificación se puede hacer en base a diferentes consideraciones como se muestra en la Figura 1.2 b.

Figura 1.3. Clasificación de las zonas de almacenamiento.



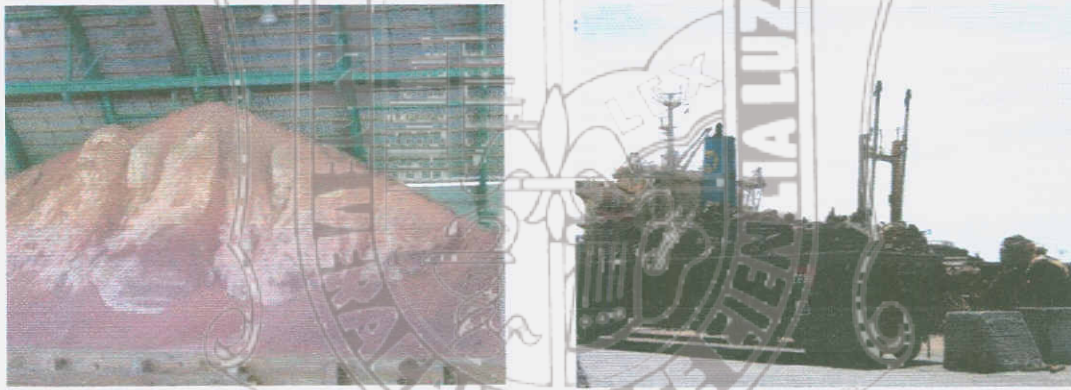
Por tipo de carga, las zonas de almacenamiento para efectos de pavimentación se pueden dividir en:

a. Almacenamiento de Granel Agrícola

Su almacenamiento es a través de silos o directamente sobre las superficies, tal como se aprecia en la Imagen 1.3 a, y los elementos a considerar en el caso de pavimentos son principalmente las cargas producidas por los equipos de manipulación.

b. Almacenamiento de Granel Mineral

En el caso del puerto de Veracruz el almacenamiento de este tipo de carga se hace en descarga directa al suelo, siendo en especial chatarra y mineral de hierro, cuyos acopios transmiten cargas relativamente pequeñas a los pavimentos, por lo que se deben considerar los equipos de manipulación (palas y cucharas) las cuales pueden transmitir cargas apreciables, además de provocar erosiones o daños a la superficie de rodamiento.



a. Granel agrícola

b. Granel mineral



c. Carga contenerizada



d. Vía de maniobras

Imagen 1.3. Clasificación de las zonas de almacenamiento.

c. Almacenamiento de Fluidos

Estos materiales se manejan de forma continua a través de instalaciones especiales en depósitos o tanques de varios tipos. Pueden existir zonas para la circulación y estacionamiento de cisterna sobre camión.

d. Almacenamiento de Carga Contenerizada

Este tipo de mercancías se almacenan en zonas descubiertas, directamente sobre el suelo o sobre otros contenedores. En el caso del puerto de Veracruz, la altura máxima de almacenamiento en la Terminal Especializada de Contenedores (ICAVE) es de 5 unidades (12 metros), esta altura puede variar de 3 a 5 unidades (7.5 a 12 metros) en función del espacio disponible, el sistema de distribución y el equipo de manipulación empleado.

A efectos de pavimentación, en estas zonas se producen cargas concentradas de gran magnitud.

e. Almacenamiento de Carga General

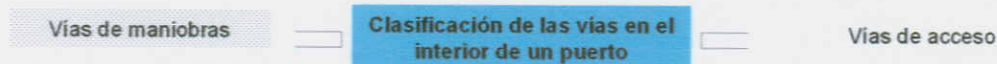
Las alturas de apilamiento de este tipo de mercancías son relativamente pequeñas, con espacios entre las mismas para permitir la circulación de los equipos de manipulación, produciendo en general cargas moderadas.

1.1.2.3 Vías de comunicación¹

Son áreas destinadas exclusivamente al tránsito de mercancías desde las zonas de operación hasta las zonas de almacenamiento, y desde éstas entre sí hasta las zonas exteriores del puerto, así como el proceso inverso.

Existen 2 tipos de vías, como se muestra en la Figura 1.4.

Figura 1.4. Clasificación de las vías de comunicación.





Las primeras unen zonas de operación con zonas de almacenamiento o cada una de ellas entre sí, su función principal es la circulación de equipos de manipulación de mercancías.

Las vías de acceso, unen las zonas de operación o almacenamiento con otras exteriores al puerto o sirven en zonas sin manipulación de mercancías, destinándose principalmente al tráfico convencional.

En cuanto a pavimentación, ambas vías deben recibir un tratamiento como el de las carreteras o vías de circulación en general.

Imagen 1.4. Vías de acceso.



1.1.2.4 Zonas complementarias

Son zonas que no cuentan con tráfico de mercancías, y corresponden principalmente a zonas urbanas con edificios y dependencias administrativas, o zonas de esparcimiento y estacionamiento de vehículos (ligeros y pesados).

Imagen 1.5. Zonas complementarias.

1.2 Características de las cargas en las superficies portuarias

En cada una de las zonas mencionadas anteriormente se generan diversos tipos de cargas que actúan sobre la superficie de los pavimentos. Existen dos clasificaciones de carga, las cuales son:

- a. Por tipo de cargas y su efecto sobre los firmes
- b. Por intensidad de uso durante la vida útil de cada superficie

Finalmente, la consideración que se debe tomar para el dimensionamiento de los pavimentos portuarios, es una combinación de la carga de cálculo y de la intensidad de uso de la superficie.

1.2.1 Por tipo de cargas¹

Bajo esta clasificación hay 3 subdivisiones:

1. Cargas de almacenamiento
2. Cargas de los equipos de manipulación de mercancías
3. Cargas de los equipos de elevación a embarcaciones

Existen diferencias entre las cargas que transmiten al pavimento las mercancías almacenadas, las cuales son estáticas, y las cargas transmitidas por los equipos, que son de naturaleza dinámica.

Por ello, para la realización de un proyecto de pavimentación es conveniente que se consideren todos los datos en la medida en que se disponga de ellos.

1.2.1.1 Cargas de almacenamiento

Son de naturaleza variable, y se deben al peso propio de las mercancías, almacenadas o apiladas sobre la superficie o en el interior de elementos auxiliares para su transporte y manipulación. Se consideran como una carga constante durante un periodo de tiempo.

Es decir, son cargas verticales, uniformemente distribuidas o concentradas, de acuerdo a la situación que se presente en el proyecto. Esto depende de los apoyos y la naturaleza de los materiales almacenados o apilados.

Para el cálculo de este tipo de cargas es importante considerar el uso previsto de la superficie y la zona en que estas cargas estarán actuando.

Otras consideraciones que también deben de realizarse son:

- Naturaleza de las mercancías depositadas o apiladas, y sus características físicas como peso específico y ángulo de rozamiento interno
- Tipo de carga (general, general fraccionada, granel agrícola, granel mineral, etc)
- Cantidad máxima que pueden manipularse
- Métodos y equipos de manipulación

a. Cargas de almacenamiento de Graneles Sólidos

Dentro de esta clasificación se encuentran el granel agrícola y el granel mineral, para el cálculo de las cargas que actuarán sobre el pavimento se debe considerar el máximo peso de los materiales por unidad de superficie transitoriamente estacionados en la zona, es decir, se considera una carga uniformemente distribuida, de acuerdo a las condiciones de apoyo del proyecto.

b. Carga de almacenamiento de Mercancía General

Se considera el máximo peso de las mercancías por unidad de superficie, es decir se manejan como cargas uniformemente distribuidas, las cuales estarán transitoriamente estacionadas en la zona de operación o estacionadas en la zona de almacenamiento en las condiciones de estiba previstas.

También es importante considerar que pueden presentarse cargas concentradas producidas por productos manufacturados apoyados sobre durmientes.

c. Carga en zonas de almacenamiento de Contenedores

La unidad de medida en el transporte de contenedores es el TEU (Transport Equivalent Unit), el cual equivale a un contenedor de 20 pies de longitud. Los más comunes son los contenedores de 20 pies (1 TEU) y los de 40 pies (2 TEU's), sin embargo también existen contenedores de 10 pies (0.5 TEU's) y de 30 pies (1.5 TEU's) ya han empezado a utilizarse los de 50 pies (2.5 TEU's).

Las cargas contenerizadas se transmiten a los pavimentos a través de elementos de apoyo de 0.178 x 0.162 m, situados en las esquinas de los contenedores.

Si existen apilamientos de varios contenedores en altura, se pueden transmitir contactos con el pavimento en otros puntos de descarga distintos a las esquinas (principalmente en pavimentos flexibles), a los cuales se les denomina "puntos de descarga".



Imagen 1.6. Isotank.

En el caso de los isotanques o contenedores refrigerados, esta situación no se presenta, ya que los largueros inferiores poseen mayor rigidez.

Las cargas totales de los contenedores son muy variables, por este motivo, las presiones de contacto sobre el pavimento dependen principalmente de la carga, de la forma de almacenamiento de los contenedores (aislados, en fila simple o en bloque), de las alturas empleadas, de la rigidez o flexibilidad del pavimento y de la existencia o no de los puntos de descarga.

Las formas de almacenamiento dependen de los criterios logísticos de cada terminal y de los equipos de manipulación. Otro criterio importante para definir el tipo de pavimento de esta zona es saber si el área de almacenamiento corresponde a contenedores vacíos o llenos.

Finalmente la probabilidad de que todos los contenedores estén totalmente cargados en altura es relativamente pequeña, bajo este criterio es recomendable el empleo de coeficientes reductores de peso según la altura de almacenamiento (hasta el 40% para apilamientos de 5 filas).

Debido a que las cargas en éstas zonas son muy elevadas, comúnmente se emplean en estas pavimentos de concreto armado o sistemas de trabes con lechos de gravón en el caso de contenedores llenos, como los que actualmente existen en la Terminal Especializada de Contenedores (ICAVE) del Puerto de Veracruz.

En caso de emplear otro tipo de superficie existe la posibilidad de un cierto grado de deterioro, debido a las altas cargas impuestas en la zona.

1.2.1.2 Cargas de los equipos de manipulación de mercancías

Las cargas que transmiten estos equipos a los pavimentos son de naturaleza variable, por lo que es importante conocer las características de los equipos de manipulación portuaria que vayan a operar en la zona, su ubicación y los requerimientos del pavimento.

Para el diseño del pavimento es necesario considerar las situaciones en que se puedan producir las cargas máximas por punto de apoyo o máximas presiones de contacto.

Una clasificación de las cargas de diseño que más comúnmente se presentan en los puertos se muestra a continuación:

Clasificación de cargas de diseño	Tipo de carga	Carga en Ton
CP1	Cargadores frontales 2 t	2.5
	Tractocamión (20 ft. 40 ft)	5.0
	Montacargas 3.5 t	4.5
	Camión T - 14	5.6
CP2	Tractocamión 40 ft	7.0
	Montacargas 6 t	7.0
	Camión T - 20	8.0
CP3	Montacargas 10 t	11.0
	Stradler Carrier	11.0
	Montacargas 15 t	7.5
CP4	Transtainer	20.0
	Camión Grúa T - 20	20.0
	ForkLift 25 t	24.5
	Camión Grúa T - 25	25.0

Tabla 1.1. Clasificación de las cargas de diseño.³

No se debe considerar la existencia de esfuerzos horizontales (por giros, aceleraciones y frenadas, etc) en el dimensionamiento estructural del pavimento, pero sí es importante tomar en cuenta las características superficiales de los mismos.¹

A continuación se describen algunos de los equipos más comúnmente utilizados en los puertos para la manipulación de mercancías, sus características, forma de operación y la forma en la que afectan en el diseño de los firmes portuarios.

a) Grúa Portacontenedores (Portainer): Este equipo se emplea en el manejo de contenedores en el muelle, esto es independiente al sistema operativo para el manejo de los contenedores dentro de la terminal, también están situados en la zona de operaciones⁴.

Asimismo se usan en forma frecuente para mover las tapas de cierre de las bodegas, su desplazamiento es a lo largo de rieles como las grúas de pórtico, de igual manera son de circulación restringida y sus cargas no actúan sobre los firmes.

b) Grúas de Pórtico (Portal Cranes): Son las grúas de muelle, se encuentran en la zona de operaciones y sirven para la transferencia de mercancía entre los modos terrestre y marítimo. Pueden trabajar con gancho para mercancía general (y excepcionalmente para contenedores) o con cuchara para Graneles.

Su circulación es restringida sobre roderas, los cuales están dispuestos por vigas, razón por la cual sus cargas no actúan sobre los firmes.¹

Aunque dentro de esta clase de equipos se ha desarrollado otro tipo de grúas, las cuales son muy similares en sus características de operación, pero varían en su forma de apoyo a las cuales se les conoce con el nombre de grúas Gottwald.

c) Grúa Gottwald: Al igual que las grúas anteriores, son equipos de muelle, se encuentran en la zona de operaciones y sirven para la transferencia de mercancía entre los modos terrestre y marítimo. Se les emplea con gancho para mercancía general y en ocasiones para contenedores o bien con algún dispositivo para la descarga de otros tipos de mercancía.

Sin embargo, a diferencia de las "Portal Cranes", las grúas Gottwald se desplazan sobre ruedas, por lo que para efectos de pavimentación se deberán considerar sus cargas impuestas en los pavimentos sobre los cuales circularán.

Existen diferentes modelos de estas grúas, desde la HMK 60 hasta la HMK 360, las cuales difieren en sus radios de alcance y la capacidad de la carga que pueden levantar.



a. Portainers



b. Portal Cranes



c. Mobile Cranes



d. Gottwald HMK. 260

Imagen 1.7. Clasificación grúas.

d) Grúas Automóviles (Mobile Cranes): Se utilizan en la manipulación de mercancía en general. En contenedores manejan almacenamientos incluso hasta de 4 alturas. Tienen capacidades de elevación que van de 10 a 140 t, aunque las longitudes de pluma pueden llegar a los 12 m o incluso más.

Las peores condiciones de trabajo se presentan cuando operan lateralmente hacia atrás sobre gatos estabilizadores.¹

e) Pórticos de almacenamiento (Transtainers): Son grúas de transferencia o grúas de pórtico sobre neumáticos, también conocidas como RTG- Rubber Tired Ganty Cranes⁴.

Se desplazan a lo largo de un camino horizontal, siempre en línea recta, no cuenta con un volante para dirigirla. Si la grúa se encuentra en reposo y sin carga, las ruedas pueden girar sobre si mismas 90°, y desplazarse según la línea perpendicular a la anterior.

Esta grúa se encarga de apilar los contenedores y efectuar los movimientos necesarios dentro de las estibas. Pueden resultar dañinos pues transmiten cargas del orden de 45 t (450 Kn) por rueda, por lo que su circulación es restringida a caminos de rodadura especiales (roderas)¹.

Incluso es común el empleo de planchas de acero en los puntos donde se producen los giros, para que el dimensionamiento de los pavimentos sea independiente a ellas.

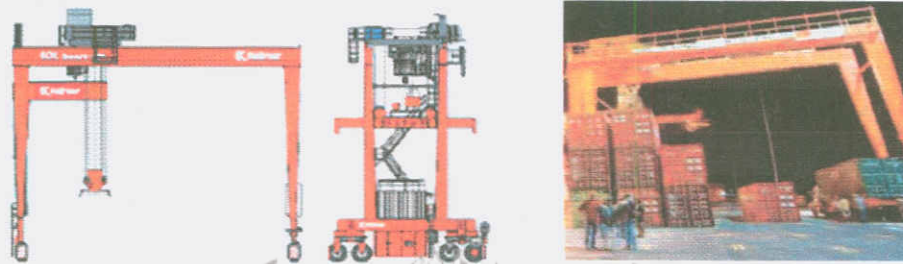


Imagen 1.8. Grúas RTG's.

f) **Carretillas de Pórtico (Straddle Carriers):** Son estructuras con ruedas que izan y transportan una carga suspendida dentro de la propia estructura¹.

Su flexibilidad operativa le permite trasladarse según se requiera por las zonas de operación y mantenimiento, es decir, no tienen restricciones.

Admiten almacenamiento hasta de 3 alturas. Sus ruedas pueden tomar todas las direcciones posibles, con lo que al girar en ángulos rectos en muy cortos recorridos o incluso parados provocan grandes esfuerzos horizontales, lo que puede producir deterioros importantes en el pavimento. Pueden alcanzar presiones hasta de 11 Kg/cm^2 (1.1 Mpa).

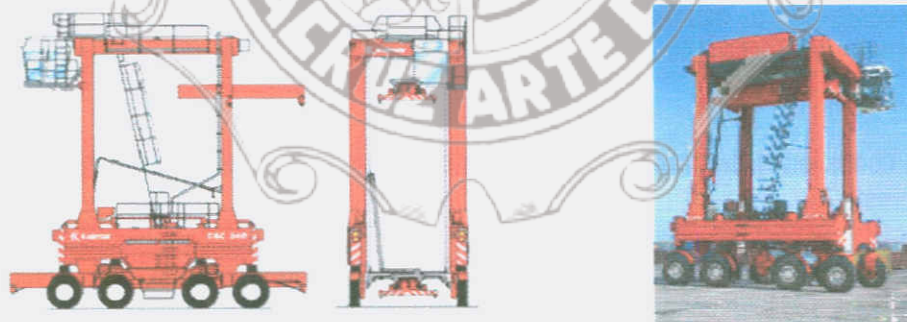
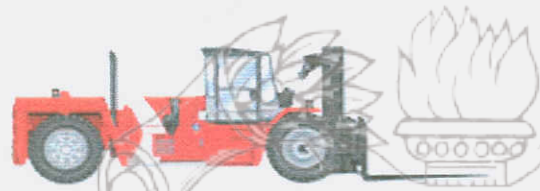


Imagen 1.9. Staddle Carrier.

g) **Cargadores Frontales (Front Lift Truck o Flt):** También son de circulación restringida por ser altamente agresivos a los pavimentos. Se emplean para manipular contenedores, admitiendo almacenamientos hasta de 4 alturas, y también para mercancía. Tienen ruedas gemelas en el eje frontal y ruedas simples en el eje posterior.¹



a. Fork Lift Truck



b. Ro-Ro Fork Lift Truck



c. Reach Stacker

Imagen 1.10. Cargadores Frontales.

h) Cargadores Laterales (Side Loader Lift Trucks): Son vehículos de circulación no restringida, empleados a veces en la manipulación de mercancía general, pero principalmente en contenedores admitiendo hasta 4 alturas.

La situación más dañina a los pavimentos no es en circulación, sino en el momento de cargar y descargar, ya que se apoyan sobre gatos estabilizadores que soportan entre el 70 y el 95% del peso conjunto del vehículo y del contenedor.¹



1.2.1.3 Cargas de los equipos de elevación a embarcaciones¹

Son cargas transmitidas al pavimento por los sistemas y equipos automóviles de elevación de barcos de pequeño desplazamiento, los cuales por lo general se encuentran en las zonas de operación.

Su circulación es sin ningún tipo de restricción y descargan al pavimento cargas de naturaleza variable, verticales, por lo que se deberán conocer las características específicas de los equipos que transitarán en la zona para realizar el diseño de la superficie.

1.2.2. Por intensidad de uso durante su vida útil¹

La intensidad es un parámetro fundamental junto con las cargas aplicadas para el diseño del pavimento, ya que da una idea del número de veces que durante la vida útil se aplica una determinada carga sobre una superficie.

Para poder conocer los valores de intensidad del tráfico es necesario determinar varios factores referentes al tránsito como lo es el tránsito promedio diario anual (TPDA), el % que representa cada tipo

de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el periodo de diseño; para lo cual se recurre a índices estimados por la autoridad portuaria correspondiente.

El cálculo del número de repeticiones esperadas para vehículos (de acuerdo a la clasificación de la SCT), así como los factores necesarios para su estimación se describe a continuación:

a) Repeticiones Esperadas

$$Re = TPDA \times \%Te \times FS \times FC \times Pd \times FCA \times 365 \quad (1.1)$$

Donde:

TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual

% Te = % del TPDA para cada tipo de eje

FS = Factor de Sentido

FC = Factor de Carril

Pd = Periodo de Diseño

FCA = Factor de Crecimiento Anual. 365 = días de un año

b) Tránsito promedio diario anual (TPDA)

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados ó a través de la autoridad portuaria. Lo importante es que se especifique la composición de este tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo, para que de esta manera se pueda identificar los tipos y pesos de los ejes que van a circular sobre el pavimento.

El método de diseño de la PCA recomienda que se considere únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas. Sin embargo, considerar el tráfico ligero dentro del diseño no es significativo, debido a que éste no influye en el diseño de espesores.

c) % del TPDA para cada tipo de eje

Los porcentajes de carga varían de acuerdo a cada tipo de camión y al número de ejes que este tenga. Para cada tipo de vehículo (de acuerdo a la clasificación de la SCT) los porcentajes del TPDA para cada tipo de eje se presentan en el anexo 3. Sin embargo, cuando el tránsito sea equipo portuario especializado, para conocer las características de las descargas de los equipos sobre los firmes se deberá de consultar al fabricante para que proporcione la ficha técnica.

d) Factor de Sentido

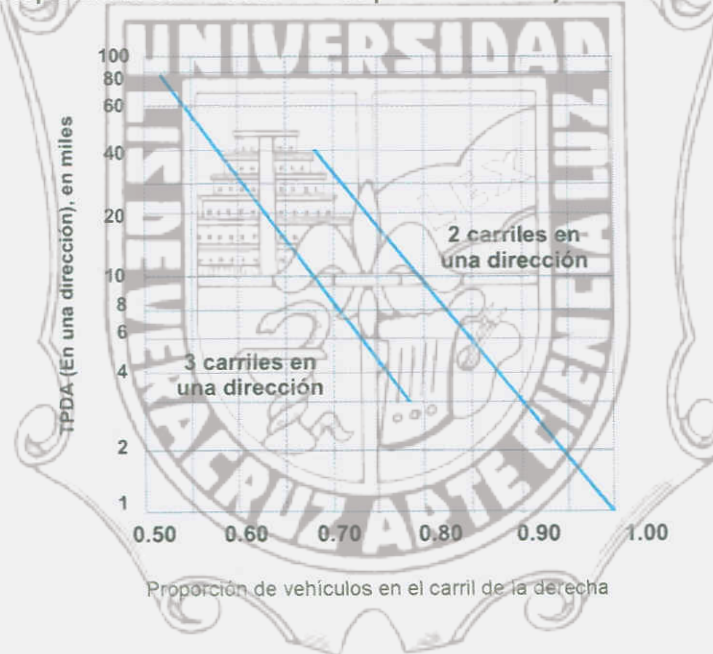
El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de sentido de 0.5 y para vialidades en un solo sentido un factor de 1.0

En el caso de vialidades de doble sentido generalmente se asume que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viajan en igual cantidad para cada dirección ($FS=0.5$). Sin embargo esto puede no aplicar en algunos casos especiales en que muchos de los camiones viajan cargados en una dirección y regresan vacíos, Si éste es el caso, se deberá hacer el ajuste apropiado y tomar en cuenta el sentido con mayor tráfico.

e) Factor de Carril

Después de verse afectado el tráfico por el factor de sentido, también se debe de analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril, el cual va a dar el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tráfico. Para esto, la PCA recomienda emplear la Figura 1.5 en donde este factor depende del número de carriles por sentido ó dirección del tráfico y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

Figura 1.5. Proporción de vehículos circulando por el carril de baja velocidad en 2 ó 3 carriles.



f) Periodo de diseño (Pd)

Normalmente estas estructuras se diseñan para periodos mayores de 20 años. Este parámetro se considera en la estimación del tránsito, el cual es considerado como una variable.

g) Factor de Crecimiento Anual (FCA)

Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere únicamente del período de diseño en años y de la tasa de crecimiento anual. Con estos datos podemos saber el factor de crecimiento a partir de la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1+g)^{n-1}}{(g)(n)} \quad (1.2)$$

Donde:

FC = Factor de Crecimiento Anual.

n = Vida útil en años.

g = Tasa de crecimiento anual, en %

1.3 Período de diseño

La vida útil es el período durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente. En los firmes portuarios la vida útil se establece de 15 a 25 años al tratarse de una infraestructura con un bajo nivel de seguridad (pequeño riesgo en vidas humanas o deterioros ambientales en caso de rotura). En general se emplea 25 años y para firmes provisionales puede emplearse 8 años.

El término de período de diseño es algunas veces considerado sinónimo del término período de análisis de tráfico.

El período de diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y por ende a cuantos vehículos y equipo deberá servir el pavimento.

1.4 Categorías de tráfico

Existen cuatro categorías de tráfico según la carga de cálculo y la intensidad de uso de la superficie considerada.

Tráfico muy pesado:	A
Tráfico pesado:	B
Tráfico medio:	C
Tráfico ligero:	D

Estas categorías aplican a todas las superficies portuarias, excepto para las vías de acceso y las zonas complementarias de circulación. Desde este punto de vista, las categorías de tráfico son una combinación de la carga de cálculo con la intensidad de uso de la superficie.

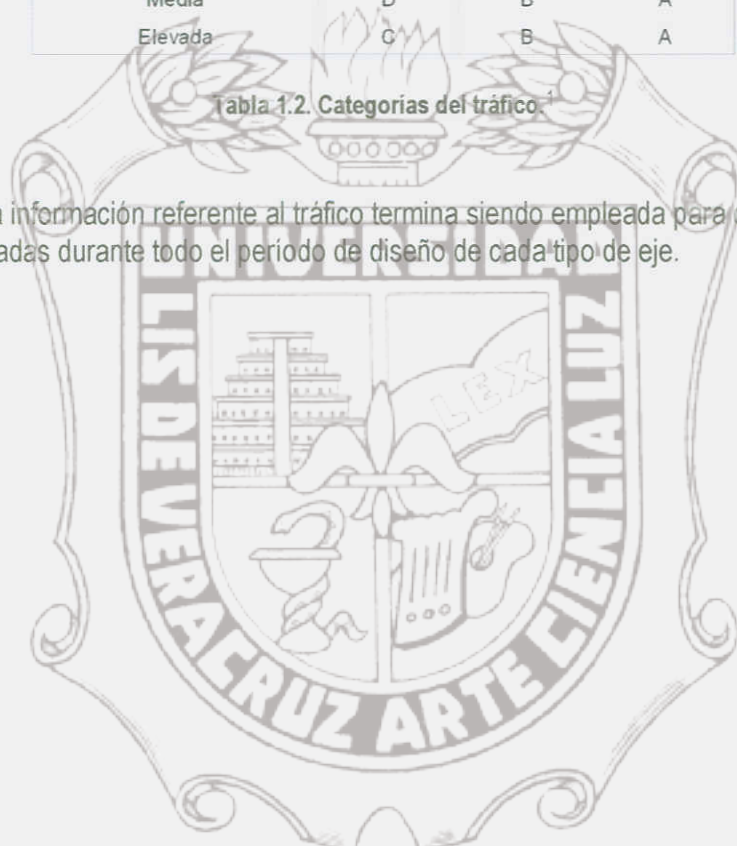
Se tomará en cuenta la mayor de todas las cargas que resulten de los análisis realizados a una misma superficie. Lo mismo aplica en el caso de que en una superficie exista duda entre dos categorías, se tomará siempre la mayor de las dos.

A continuación se muestra la clasificación anteriormente mencionada.

Intensidad de uso	Carga de cálculo		
	Baja	Media	Alta
Reducida	D	C	B
Media	D	B	A
Elevada	C	B	A

Tabla 1.2. Categorías del tráfico.

Finalmente, toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas durante todo el periodo de diseño de cada tipo de eje.





CAPÍTULO 2: DIMENSIONAMIENTO EN PAVIMENTOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO Y CRITERIOS DE DISEÑO

Se han mencionado en capítulos anteriores las condiciones que intervienen en el dimensionamiento de los pavimentos portuarios. En este capítulo se exponen los métodos de diseño para pavimentos rígidos, la descripción del método a emplear y las variables de estudio que intervendrán en el modelo a proponer con la ayuda del software RAM Advance.

También se exponen los factores que afectan la fatiga del concreto y que deberán ser tomados en cuenta independientemente del método de diseño que se quiera utilizar.

Con el objeto de seguir la línea secuencial de los criterios de diseño, se presenta un resumen de la metodología del PCA para el dimensionamiento de pavimentos rígidos, su evolución y una comparativa con el método AASHTO.

Otro factor importante sobre el cual se hace mención en el capítulo, son los tipos de juntas que existen, su distribución y dimensionamiento, y cómo la colocación de estos elementos pueden aumentar la durabilidad del pavimento evitando su agrietamiento.

2.1 Criterios de diseño para el concreto en pavimentos

2.1.1 Generalidades

Cuando el concreto hidráulico se usa en la construcción de pavimentos, las condiciones de calidad establecidas son un tanto diferentes a las requeridas para usos más comunes de este material.

Aunque la resistencia a la compresión sigue siendo importante, garantizar un módulo de ruptura adecuado a las condiciones de uso se vuelve fundamental en el caso de los concretos para pavimentos. La durabilidad, la resistencia al desgaste y otras, son características que se vuelven fundamentales, a diferencia de aquellas que se requieren en la construcción de edificios.

Encontrar un método de diseño que garantice esas características con el resultado de un concreto económico que posteriormente sea aplicable a pavimentos, es una tarea importante. La finalidad de este trabajo mantiene esa ruta, para lo cual se ha considerado agregar al concreto, fibras sintéticas de polipropileno.

2.1.2 Factores que afectan la fatiga en el concreto hidráulico

Los principales factores que afectan la fatiga en el concreto hidráulico son:

- a) Número de aplicaciones de carga
- b) Resistencia y módulo de ruptura
- c) Espesor de la losa de concreto
- d) Espaciamiento entre juntas transversales
- e) Apoyo en el borde de las losas

f) Apoyo de la sub-rasante

a) Número de aplicaciones de la carga

Resultados experimentales⁵ han mostrado que el orden de aplicaciones de carga tiene un efecto significativo sobre el valor final de daño por fatiga. Esto es, el número total de ciclos de carga aplicados está influenciado por la secuencia de aplicación.

El número de ciclos de carga y descarga que un concreto es capaz de resistir antes de fallar depende básicamente del nivel de esfuerzos máximo aplicado (σ/σ_r), de manera tal que conforme disminuye este nivel de esfuerzos se incrementa el número de ciclos que el concreto puede soportar. Aún trabajando a niveles de esfuerzos muy bajos, el concreto puede fallar por fatiga si el número de ciclos de carga y descarga es lo suficientemente grande.

Por ello se considera que el concreto tiene límite de duración de fatiga, a diferencia del acero de refuerzo que al hacerlo trabajar a niveles de esfuerzos menores del 50% de su resistencia a la tensión, capaz de resistir sin falla por fatiga un número prácticamente infinito de ciclos de carga y descarga.

b) Resistencia y módulo de ruptura

Un incremento en el módulo de ruptura del concreto se traduce en una reducción de los agrietamientos de la losa. Esta tendencia está de acuerdo con los principios mecanicistas; sin embargo, como el módulo de elasticidad está directamente relacionado con la resistencia, un módulo mayor genera esfuerzos mayores.

c) Espesor de la losa de concreto

El espesor de la losa de concreto es uno de los parámetros más sensibles que afectan el agrietamiento de los pavimentos, esta tendencia es esperada porque una losa más gruesa exhibe esfuerzos mucho menores que una losa más delgada bajo las mismas condiciones del sitio, asumiendo que todos los demás parámetros se mantienen constantes.

d) Espaciamiento entre juntas transversales

Un incremento en el espaciamiento de las juntas puede resultar en un dramático incremento en el agrietamiento de las losas, esta tendencia coincide con numerosas observaciones de campo donde las losas más largas se agrietan más temprano que las losas más cortas en pavimentos con espaciamiento variable entre juntas.

El espaciamiento entre juntas afecta el agrietamiento transversal debido a su influencia sobre los esfuerzos de alabeo. Se ha encontrado que un incremento en el espaciamiento entre las juntas genera un número mayor de grietas por losa.

e) Apoyo en el borde de las losas

Los apoyos en las esquinas de las losas de concreto mejoran el comportamiento de éstas al agrietamiento debido a que generan una reducción de los esfuerzos en el borde de los pavimentos. Su efectividad depende de la eficiencia de la transferencia de carga a través de la unión.

Las losas amplias mueven efectivamente el tránsito lejos del borde de los pavimentos, permitiendo la generación de esfuerzos interiores (en vez de esfuerzos mucho mayores en el borde) como sucede en las losas de menor tamaño.

f) Apoyo de la subrasante

El módulo de reacción de la subrasante tiene un efecto relativamente menor en el agrietamiento del concreto hidráulico. En los casos en los que la explanada sobre la cual se apoyará el pavimento no tenga la calidad suficiente, deberá colocarse una sub-base de material granular, reduciendo las presiones sobre el material debajo del pavimento por la distribución de las cargas sobre una amplia superficie.

De acuerdo a las cargas que vayan a transitar por el pavimento, será el tipo de base recomendada según las características de las bases y sub-bases descritas en el anexo 1 apartado A1.2 de este estudio.

2.2 Métodos de dimensionamiento

Los métodos analíticos de dimensionamiento son procedimientos con la capacidad de relacionar el cálculo tensional, basado en las propiedades de los materiales determinadas en laboratorio, con el comportamiento de los pavimentos durante su vida de servicio.

La mayor parte de los métodos de dimensionamiento han sido establecidos empíricamente observando el funcionamiento de una amplia gama de pavimentos experimentales medidos y analizados mediante ensayos a escala real bajo condiciones controladas, o secciones en servicio sometidas al tráfico real.

Existen básicamente dos métodos de mayor utilización y difusión a nivel internacional para el cálculo de pavimentos rígidos con este enfoque:

- 1) Método AASHTO (1993)
- 2) Método PCA (1984)

2.2.1 Método AASTHO⁶

a) Prueba de pavimentación AASHTO

El método de diseño de espesores de pavimentos rígidos está basado en los resultados obtenidos de la prueba de carreteras concebida y promovida por la AASHTO, para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente en secciones conocidas de pavimentos rígidos y flexibles. La planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. El tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960 y el método estuvo listo para 1961.

b) Formulación del método de diseño

Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas que podían dar nuevamente valores numéricos de capacidad de servicio. Estos valores graficados contra las aplicaciones de carga forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de los diversos diseños.

c) Variables

- Espesor.
- Serviciabilidad (inicial y final)
- Tráfico (ejes equivalentes)
- Transferencia de carga
- Propiedades del concreto (módulos de ruptura y elasticidad)
- Resistencia de la subrasante (módulo de reacción)
- Drenaje
- Confiabilidad

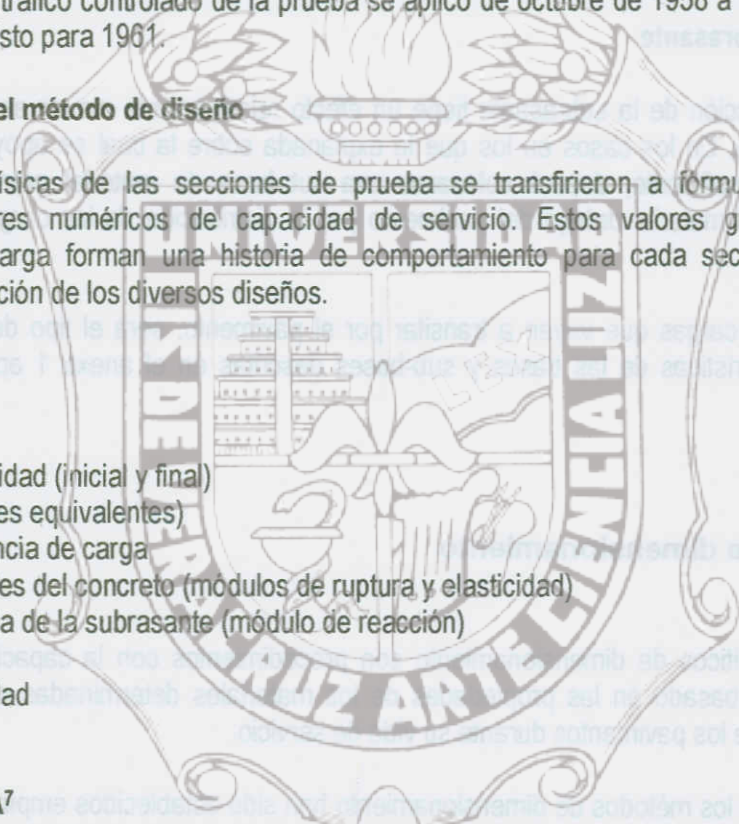
2.2.2 Método PCA⁷

a) Aspectos generales

El método de diseño de la Portland Cement Association se aplica exclusivamente para pavimentos de concreto, el método fue publicado en 1966 y está basado en el concepto de "consumo de resistencia". En este método se calculan las tensiones que produce el tránsito en cada rango de carga, comparándolas con la resistencia de diseño adoptada denominando la relación de ellas como "razón de esfuerzos".

b) Formulación del método

Después de muchos años de aplicación y revisión se publicó en 1984, un nuevo método cuyo autor es Robert G. Packard. Este procedimiento permite cuantificar la influencia que significa colocar un apoyo lateral, a diferencia de otros métodos que solo señalan este efecto desde el punto de vista cualitativo.



El método de diseño de la PCA considera dos criterios de evaluación en el procedimiento de diseño, el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y la fatiga del pavimento de concreto.

De acuerdo a este valor se establece el número de repeticiones permitidas en cada rango de carga, que comparado con el número de repeticiones esperadas, permite establecer un porcentaje de consumo de resistencia por cada rango de carga, cuya suma no debe exceder de un 100%.

El procedimiento fue desarrollado usando los resultados de los análisis de elemento finito con cargas inducidas en pavimentos de concretos por unión, borde, y carga de esquina.

Los análisis tienen en cuenta el grado de transferencia de carga proporcionada por pasadores y considera que el conjunto se entrelaza. El procedimiento PCA, emplea el concepto en el que la k de diseño es una función del grado del suelo, el espesor del mismo, el tratamiento del suelo en caso de existir o en los casos más simples es una correlación del CBR del suelo (ver Figura A1.2).

c) Variables

Los factores primarios del método PCA son el periodo de diseño y el tráfico (incluyendo el factor de seguridad a la carga, el eje carga y la distribución), tal y como se menciona en el apartado 1.2.2.

Una vez que se cuenta con estos datos, las variables que intervienen en el diseño son:

- Espesor Inicial del Pavimento
- Módulo de Reacción K del suelo
- Tráfico (El cual incluye el periodo de diseño)
- Transferencia de Carga y Soporte Lateral
- Propiedades del Concreto

2.2.3 Comparación entre ambos métodos

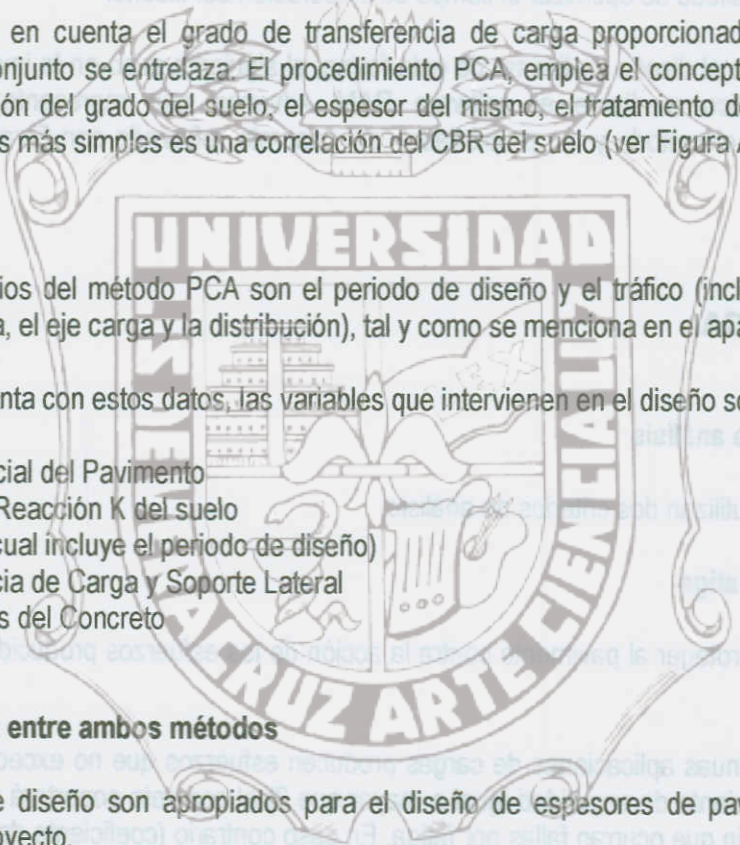
Ambos métodos de diseño son apropiados para el diseño de espesores de pavimentos rígidos en cualquier tipo de proyecto.

A diferencia del método AASHTO el método de diseño PCA, consideró un valor fijo de módulo de elasticidad del concreto y del coeficiente de poisson, que no varía en relación con la resistencia a la flexión del concreto (M_r).

Este método considera algunas limitaciones en los valores del módulo de reacción K del suelo, donde el rango de valores para los que el método fue desarrollado oscila entre los 3.5 y 50 kg/cm^2 .

Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo en Ejes Sencillos Equivalentes.

Los resultados del método de la PCA son adecuados para cualquier tipo de proyecto a pesar de que no se toman en cuenta algunos factores importantes como lo son la serviciabilidad inicial y final. En cambio



considera de una manera más real la contribución del tráfico en la formulación, lo que ayuda a modelar de mejor manera las condiciones del proyecto al momento de estar diseñando su espesor.

Como en operación portuaria el diseño de los pavimentos depende en gran medida de los equipos que circulan por ellos, así como sus características, se optó por emplear el método del PCA (Portland Cement Association) para el desarrollo de la investigación con fines prácticos.

Sin embargo, se debe tener presente, que para su aplicación se utilizan una serie de tablas que aunque son de fácil manejo requieren tiempo para la estimación del espesor, por lo cual se programó en Excel el número de repeticiones esperadas en función de los datos del TPDA, así como la metodología del método con la finalidad de optimizar el tiempo de elaboración del diseño.

Una vez realizado el diseño preliminar de esta forma, el siguiente paso en la investigación es crear un modelo matemático mediante el software RAM Advanse que represente todas las variables consideradas en el método y las propiedades del concreto reforzado con fibras PP estimadas en el laboratorio.

2.3 Método PCA

2.3.1 Criterios de análisis

En el método se utilizan dos criterios de análisis:

a) Análisis por Fatiga

Se realiza para proteger al pavimento contra la acción de los esfuerzos producidos por la repetición de las cargas.

Cuando las continuas aplicaciones de cargas producen esfuerzos que no exceden el 50% del módulo de ruptura (coeficiente de seguridad igual o mayor que 2) el concreto soportará un número ilimitado de tales esfuerzos sin que ocurran fallas por fatiga. En caso contrario (coeficiente de seguridad entre 1 y 2) queda limitado al número de repeticiones de los esfuerzos para que el concreto no experimente fallas por fatiga.

Este número límite o permitido de repeticiones de los esfuerzos (cargas), puede determinarse mediante el uso del nomograma editado por la PCA, que se muestran en la Figura A2.1, en el anexo 2 de este estudio.

Como la capacidad estructural del pavimento está medida por el número de cargas por ejes que puede soportar sin fallas, la capacidad asumida para cualquier edad considerada, es la suma de la resistencia por fatiga consumida por cada grupo de cargas por eje.

Si un grupo de cargas consume por ejemplo el 60% de la resistencia a la fatiga, queda un 40% de capacidad estructural del pavimento para ser consumida por erosión o por otros factores externos.

Este análisis por fatiga influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas en las juntas.

Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje.

De acuerdo a las investigaciones realizadas por la PCA se recomiendan los siguientes factores de carga:

1. Para carreteras con alto volumen de tránsito, sin interrupción. (F.S. = 1,2)
2. Para carreteras y calles arteriales con moderado volumen de tránsito pesado. (F.S. = 1,1)
3. Para caminos, calles residenciales y otros, con escaso volumen de tránsito pesado (F.S. = 1,0)

Ha sido práctica común desde el pasado, incrementar el valor de las cargas para el diseño, para considerar el efecto del impacto. Sin embargo, las experiencias y ensayos muestran que las tensiones producidas por las cargas móviles de los vehículos son menores que las ocasionadas por las cargas estáticas de igual magnitud.

b) Análisis de Erosión

El análisis de erosión cuantifica la capacidad que tiene la esquina de una losa para ser desviada por la carga de una rueda en función del espesor de la misma, el valor K de la sub-rasante, y la presión estimada en la interfase de la losa y el suelo.

El análisis por erosión influye principalmente en el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de cargas por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Este análisis se realiza con la finalidad de limitar los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes de las losas, juntas, esquinas y controlar así la erosión de la base y de los materiales de apoyo, o sea controlar el desnivel entre losas y deterioro de los apoyos, los cuales son aspectos independientes de la fatiga.

Sin embargo, estudios recientes han mostrado que el fracturamiento por fatiga es extenso y suele ser considerado como el mayor o único criterio para el diseño de pavimentos de concreto, a pesar de que en ocasiones es conveniente considerar la erosión.

Así, un espesor adecuado es aquel para el cual las contribuciones de todos los niveles de carga de eje por fatiga y el daño de erosión sea menor al 100 por ciento.

2.3.2 Descripción de las variables de diseño

A continuación se describen cada uno de estos parámetros.

a) Espesor inicial del pavimento: El método del PCA se inicia con la selección del espesor del pavimento, posteriormente se revisa si es suficiente el espesor propuesto para las cargas aplicadas durante el periodo de vida útil del pavimento.

b) Módulo de reacción del suelo (K). El método establece como parámetro de resistencia el valor del módulo de reacción de la capa subrasante cuando la losa va apoyada directamente sobre ella o adopta el valor del módulo de reacción del conjunto Subbase/Subrasante cuando se usan los diferentes tipos de subbase previstos en el método.

El soporte que la sub-rasante presta al pavimento se expresa mediante el valor del módulo de reacción "K" y puede determinarse por correlación de los valores de soporte como se muestra en la Figura A1.2, o bien si se trata de bases tratadas con cemento se pueden obtener los valores de "K" por extrapolación de la Tabla A1.2.

c) Tránsito. La variable se cuantifica estableciendo el espectro de cargas y el número de repeticiones de cada rango de cargas que se espera en el carril de diseño durante el periodo de vida útil, tal como se describe en el apartado 1.2.2.

d) Transferencia de carga y soporte lateral. Con el fin de realizar los análisis de fatiga y erosión, el método contempla dentro de sus análisis la incidencia de la protección lateral de la losa de concreto y el tipo de transmisión de cargas en las juntas.

La transferencia de carga varía en función del tipo de uniones con/ sin pasadores, este factor el diseñador lo toma en cuenta a la hora de seleccionar las tablas de apoyo de la PCA, sin embargo la condición es una variable que ya va implícita en las tablas de diseño, al igual que la consideración del soporte lateral.

e) Resistencia del concreto y Módulo de ruptura. La resistencia del concreto se evalúa mediante el módulo de ruptura (M_r), el cual se recomienda que esté en un rango entre 40 y 50 Kg/cm².

La resistencia a la compresión es una medida universal de la calidad y durabilidad del concreto, ya que la información sobre la resistencia a la compresión está disponible con facilidad, se han hecho estudios para correlacionar con otras propiedades. Una relación general entre el módulo de ruptura y la resistencia a la compresión es:

$$M_r = 2.12\sqrt{f'_c} \text{ a } 2.65\sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

Donde:

M_r = Módulo de ruptura (kg/cm²)

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto (Kg/cm²)

f) **Módulo de elasticidad y relación de poisson.** En el procedimiento de diseño de la PCA, la determinación del esfuerzo equivalente está basado en el esfuerzo máximo de flexión para diferentes espesores de la losa y módulos de reacción del suelo. Los parámetros constantes de entrada asumidos son:

Módulo de elasticidad de la losa, $E = 280,000 \text{ Kg/cm}^2$

Relación de Poisson $\mu = 0.15$

Este esfuerzo considera un factor de ajuste para la reducción de la resistencia del concreto por un coeficiente de variación del 15%. sin embargo esta reducción ya va implícita en las tablas de diseño, lo que significa que al revisar el espesor de un pavimento el diseñador no debe reducir la resistencia del concreto.

2.3.3 Procedimiento de diseño

El método se emplea una vez que ya se han obtenido los datos del tráfico esperado conforme se indica en el apartado 1.2.2, así de esta información se obtienen el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el periodo de diseño.

El diseño del espesor se calcula por tanteos con ayuda del formato de diseño que se presenta en la Tabla 2.1.

Buscando la optimización en el diseño, la Tabla 2.1 se ha programado en Excel para obtener los datos del tránsito en función del TPDA, los porcentajes de carga en cada eje de acuerdo a cada tipo de camión (Anexo 3).

Para calcular el espesor del pavimento por el método de PCA, se siguen los siguientes pasos:

1. Definir los parámetros de entrada anteriormente descritos.
2. Proponer tentativamente un espesor del pavimento para resistir las cargas impuestas; estas cargas deberán estar ya afectadas por el factor de seguridad.
3. Con la información contenida en (1) y (2) determinar los valores de "Esfuerzo Equivalente" y "Factor de Erosión" en las Tablas correspondientes del Anexo 2.

a) Análisis por fatiga

Se emplean las mismas tablas y figuras para pavimentos con ó sin pasajuntas, mientras que la única variable es si se cuenta ó no con apoyo lateral, de manera que:

Sin apoyo lateral.

- Usar la Tabla A2.1 y la Figura A2.1

Con apoyo lateral.

- Use la Tabla A2.2 y la Figura A2.1



1ra Parte. Fundamentos teóricos de la investigación

Proyecto: _____
 Espesor Inicial: _____ cm Pasajuntas: _____
 Base: _____
 Módulo de reacción K: _____ kg/cm² Apoyo Lateral: _____
 Módulo de ruptura, MR: _____ kg/cm² Período de diseño: _____ Años
 Factor de seguridad: _____ Comentarios: _____

Carga del eje	Carga Pu	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Permisibles Fig.A.1	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles Fig.A.1 ó A.2	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente 10. Factor de erosión
9. Factor de relación de esfuerzos

Ejes sencillos

Pu	Repeticiones esperadas				
1.76					
2.20					
2.64					
2.86					
3.74					
4.40					
4.84					
4.90					
5.06					
5.10					
5.30					
5.50					
6.60					
7.04					
7.10					
7.48					
7.50					
7.70					
8.36					
8.80					
9.90					
12.10					
15.40					
22.00					

11. Esfuerzo equivalente 13. Factor de erosión
12. Factor de relación de esfuerzos

Ejes Tandem

6.60					
7.04					
7.26					
7.70					
8.80					
9.90					
11.00					
15.40					
17.60					
30.80					
39.60					
39.70					

14. Esfuerzo equivalente 16. Factor de erosión
15. Factor de relación de esfuerzos

Ejes Tridem

11.00					
17.60					
49.50					

Total 0 Total 0

Tabla 2.1. Formato para el cálculo del espesor de pavimentos.

Procedimiento:

1. Introducir como datos los valores de esfuerzo equivalente en las celdas 8, 11, 14 del formato de diseño de espesores. Estos valores se obtienen de las tablas apropiadas de factores de esfuerzos equivalentes (Tablas A2.1 y A2.2), dependiendo del espesor inicial y el valor de K.
2. Dividir los valores de esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura del concreto, al resultado se le llama relación de esfuerzos (σ_t / σ) y se obtiene una para cada tipo de eje (sencillo, tándem y tridem). Estos valores se anotan en el formato de diseño de espesores (Tabla 2.1) en las celdas 9, 12 y 15.
3. Llenar la columna 4 de "repeticiones permisibles" obtenidas en la figura A2.1.
4. Obtener el porcentaje de fatiga de cada eje. El porcentaje de fatiga se anota en la columna 5 y se obtiene dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permisibles (columna 4) por 100, esto se hace para cada eje y posteriormente se suman todos los porcentajes de daño por fatiga para obtener el porcentaje total.

b) Análisis por erosión

Sin apoyo lateral

- Para pavimentos con pasajuntas, emplear la Tabla A2.3 y la Figura A2.2
- En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados (sin pasadores), se usa la Tabla A2.5 y la Figura A2.2

Con apoyo lateral

- Para pavimentos con pasajuntas ó continuamente reforzados, emplear la Tabla A2.4 y la Figura A2.3
- En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados (sin pasadores), se usa la Tabla A2.6 y la Figura A2.3.

Procedimiento:

1. Anotar en las celdas 10,13 y 16 del formato de diseño de espesores, los correspondientes factores de erosión obtenidos de las tablas adecuadas.
2. Calcular las "repeticiones permisibles" con ayuda de la Figura A2.2 y la Figura A2.3, y anotarlos en la columna 6 del formato de diseño de espesores.

3. Calcular el porcentaje de daño por erosión (columna 7) para cada eje dividiendo las repeticiones esperadas (columna 3) entre las repeticiones permitidas (columna 6) y multiplicando el resultado por 100, para posteriormente totalizar el daño por erosión.

Al emplear las gráficas no es necesaria una exacta interpolación de las repeticiones permisibles. Si la línea de intersección corre por encima de la parte superior de la gráfica, se considera que las repeticiones de carga permisibles son ilimitadas.

Finalmente, la suma de la columna fatiga, permite establecer si el espesor tentativo cumple los requerimientos. Estos deberán ser tales que cada uno no debe exceder de 100%. En caso contrario debe incrementarse el espesor tentativo y recalcular.

2.4 Tipos de juntas, distribución, y dimensionamiento

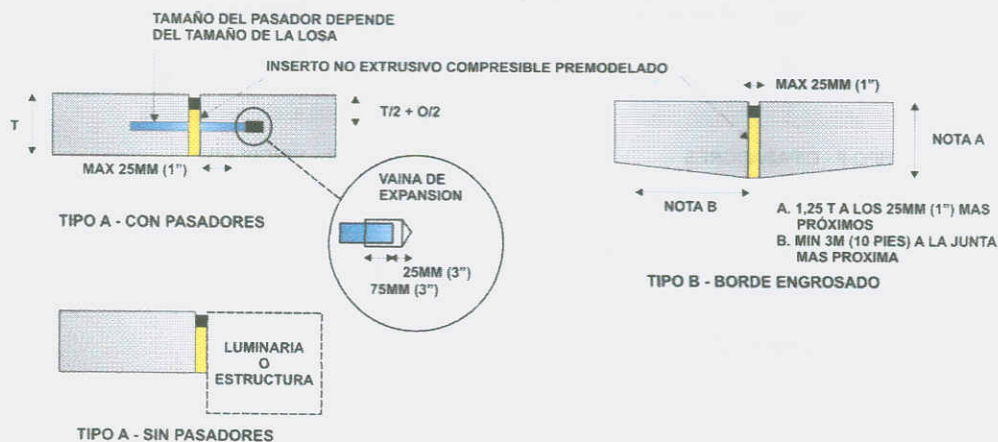
2.4.1 Tipos de juntas

Su finalidad es mantener los esfuerzos que soporta el pavimento dentro de condiciones admisibles, evitando la formación de fisuras y grietas irregulares.

Dentro de las juntas se identifican diferentes tipos, asimismo la separación entre ellas dependerá del tipo de junta de que se trate.

a) Juntas de expansión: Su objetivo es reducir los esfuerzos de compresión, proveyendo un espacio entre losas, que permita el movimiento del pavimento cuando se expande. Cuando las juntas de contracción están adecuadamente separadas, la necesidad de las juntas de expansión, depende, en gran medida de la temperatura ambiente.

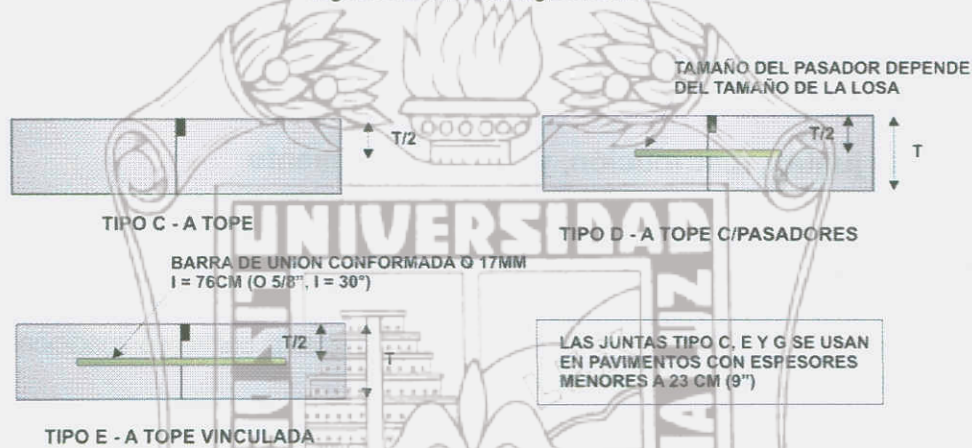
Figura 2.1. Juntas de expansión.



Cada tipo de junta, presenta características específicas que como se mencionó anteriormente deben de tomarse en cuenta al momento de realizar un adecuado diseño de un pavimento, considerando además el tipo de cargas que se impondrán sobre él.

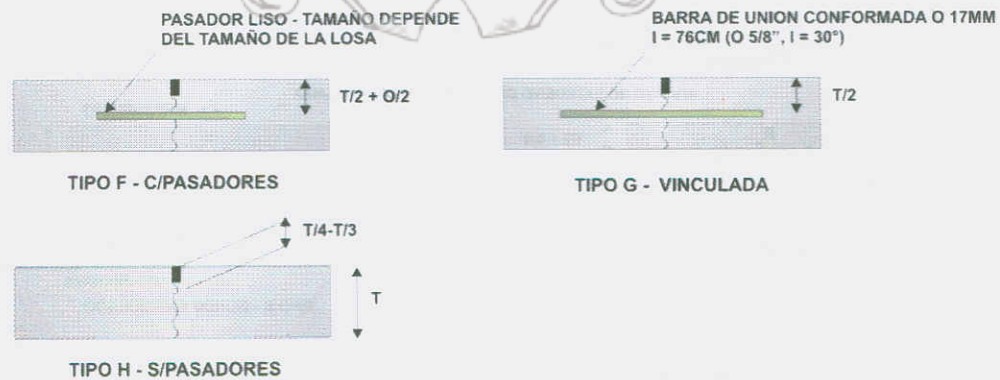
b) Juntas longitudinales: Se instalan para controlar el asentamiento longitudinal, espaciadas a intervalos de 2.50 a 4.0 metros. La profundidad de la ranura superior de estas juntas no debe ser inferior al cuarto del espesor del pavimento.

Figura 2.2. Juntas longitudinales.



c) Juntas transversales: Denominadas de “contracción”, controlan el agrietamiento transversal al disminuir el alabeo producido por las tensiones por diferenciales de temperatura.

Figura 2.3. Juntas transversales de contracción.



Existe una regla práctica que permite dimensionar los tableros de losas para inducir el agrietamiento controlado bajo los cortes de losas, sin necesidad de colocar acero de refuerzo continuo:

$$SJT = (21 \text{ a } 24) T$$

Donde:

SJT = Separación de Juntas Transversales ($\leq 5.5 \text{ m}$)

T = Espesor del Pavimento

2.4.2 Distribución y dimensionamiento

a) Barras de unión

Las barras de unión se colocan a través de las **juntas longitudinales** para evitar la separación de sus bordes, manteniéndolos en contacto y asegurando la transferencia de cargas entre las losas adyacentes.

Las barras de amarre se colocan a lo largo de la junta longitudinal para amarrar dos losas, con la finalidad de que se mantengan juntas y de que se asegure que la carga se transfiera a través de la junta.

La cantidad de acero requerido para las barras de amarre se determina de manera práctica de acuerdo a la Tabla 2.2.

Espesor Pavimento (cm)	Tamaño de la varilla (cm)	Distancia al extremo libre			
		305 cm	366 cm	427 cm	732 cm
12.7	1.27 x 61	76 cm	76 cm	76 cm	71 cm
14.0	1.27 x 64	76 cm	76 cm	76 cm	64 cm
15.2	1.27 x 66	76 cm	76 cm	76 cm	58 cm
16.5	1.27 x 69	76 cm	76 cm	76 cm	53 cm
17.8	1.27 x 71	76 cm	76 cm	76 cm	51 cm
19.1	1.27 x 74	76 cm	76 cm	76 cm	46 cm
20.3	1.27 x 76	76 cm	76 cm	76 cm	43 cm
21.6	1.27 x 79	76 cm	76 cm	71 cm	41 cm
22.9	1.59 x 76	91 cm	91 cm	91 cm	61 cm
24.1	1.59 x 79	91 cm	91 cm	91 cm	58 cm
25.4	1.59 x 81	91 cm	91 cm	91 cm	56 cm
26.7	1.59 x 84	91 cm	91 cm	91 cm	53 cm
27.9	1.59 x 86	91 cm	91 cm	91 cm	51 cm
29.2	1.59 x 89	91 cm	91 cm	91 cm	48 cm
30.5	1.59 x 91	91 cm	91 cm	91 cm	46 cm

Tabla 2.2 Espaciamento mínimo de barras de unión.

Varios organismos usan el diseño estándar de barras de amarre para simplificar la construcción. Las barras del No.4 de diámetro por 91 cm de longitud y separación de 76 a 101 cm son las que comúnmente se usan.

b) Pasajuntas

Los pasajuntas se usan en las juntas transversales para transferir las cargas a las losas adyacentes. El esfuerzo y la deflexión en la junta son mucho más pequeños cuando las cargas son soportadas por dos losas que cuando es por una sola. El uso de pasajuntas puede minimizar las fallas de bombeo y de diferencia de elevación de juntas, las cuales han sido considerados por la PCA como factores importantes en el diseño de espesor.

Para el modelado mediante software estos pasadores se pueden representar por medio de articulaciones, es decir, elementos que no transfieren momento pero si aceptan fuerza cortante.

El diseño de pasajuntas se basa mucho en la experiencia, aunque algunos métodos teóricos sobre el diseño de pasajuntas están disponibles. El tamaño de las pasajuntas depende del espesor de la losa.

La Tabla 2.3 muestra el diámetro y longitud de las pasajuntas para diferentes espesores de losa como lo recomienda la PCA (1975). Se puede apreciar que el diámetro de las pasajuntas es igual a un octavo del espesor de la losa.

En una edición reciente de diseño de juntas, la PCA (1991) recomienda el uso de pasajuntas de 1.25 in de diámetro para pavimentos de autopistas con espesores menores a 25 cm y pasajuntas de diámetro de 1.5 in para pavimentos con espesores mayores a 25 cm. Se necesitan pasajuntas con un diámetro mínimo de 1.25 a 1.5 in para controlar fallas mediante la reducción del esfuerzo de carga en el concreto.

Espesor de losa		Barras Pasajuntas					
cm	in	Diámetro		Longitud		Separación	
		mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

Tabla 2.3. Espaciamiento mínimo de pasajuntas.

2.5 Determinación del acero de refuerzo

Para controlar el agrietamiento, el cual es más fácil que se presente en losas de grandes dimensiones, se debe colocar acero de refuerzo distribuido a lo largo de toda la losa, cuya función es mantener unidos los bordes de cualquier grieta que pudiera ocurrir.

Este tipo de refuerzo también se emplea para aumentar la capacidad estructural del pavimento. La cantidad de acero para el control del agrietamiento se obtiene por medio de la ecuación:

$$A_s = \frac{F_a h L W}{2 F_y} \quad (2.2)$$

En donde:

- As= Área requerida de acero por metro de longitud de la losa (cm²/m)
- Fa= Coeficiente promedio de fricción entre la losa y el terreno de soporte, que normalmente se considera de 1.5
- h = Espesor del pavimento (m)
- Fy= Esfuerzo de fluencia en el acero (kg/cm²)
- L= Es la longitud de la losa en la dirección que se desea colocar el acero (m)
- W= Peso volumétrico del concreto en kg/m³

Para esta finalidad se emplea la malla electrosoldada, las barras o bien como en el caso de la presente investigación en la cual se pretende sustituir la malla electrosoldada por las fibras PP.

En caso de ser necesario un refuerzo para evitar el agrietamiento de las losas por medio de acero se debe calcular de acuerdo a la fórmula anterior. La ventaja de la malla electrosoldada es que se encuentra en diversos calibres y áreas. A continuación la Tabla 2.4, muestra las dimensiones comerciales de la malla electrosoldada.

	Diseño	Diámetro en mm	Área del alambre en mm ²	Peso Kg/m	Área de acero cm ² /m	Peso por m ² (Kg)
ROLLO	R-66-1010	3.43	9.24	0.072	0.61	0.97
	R-66-88	4.11	13.26	0.104	0.87	1.41
	R-66-66	4.88	18.7	0.147	1.23	1.97
	R-66-44	5.72	25.69	0.202	1.69	2.71
HOJA	R-66-1010	3.43	9.24	0.072	0.61	0.97
	R-66-88	4.11	13.26	0.104	0.87	1.41
	R-66-66	4.88	18.7	0.147	1.23	1.97
	R-66-44	5.72	25.69	0.202	1.69	2.71
	R-66-33	6.19	30.09	0.236	1.975	3.19
	R-66-22	6.67	34.94	0.274	2.293	3.68

Tabla 2.4. Presentaciones de la malla electrosoldada⁸.



CAPÍTULO 3. FIBRAS EN LA CONSTRUCCIÓN,
SU OBTENCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se revisa la clasificación, obtención y el estado del arte de las fibras empleadas como refuerzo en materiales para la construcción. Se presenta la definición de las fibras, su evolución y su aplicación actual en materiales compuestos como el concreto.

El recorrido a través de la historia abarca el uso de las fibras naturales como herramienta en la construcción desde tiempos antiguos hasta los más recientes estudios e investigaciones acerca de ellas.

Además, se mencionan los principales tipos de fibras que han sido probadas en el concreto, sus ventajas, desventajas y el porqué se continúa en la búsqueda de fibras que sirvan como refuerzo al mismo, lo cual justifica el porqué esta investigación se ha enfocado al uso de las fibras PP.

La propuesta del proyecto, contiene al mismo tiempo un fin ambientalista, por lo que se ha incluido una breve referencia de la problemática del reciclaje de los plásticos.

3.1 Descripción de las fibras

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas cuya longitud es muy superior a su diámetro (que no suele ser mayor a 0.05 cm), y están orientadas a lo largo de un solo eje. Se doblan con facilidad y desde hace muchos años las que son de origen natural, han sido empleadas como refuerzo en el concreto.

Desde siempre las fibras han representado una alternativa para satisfacer diversas necesidades del hombre. Antiguamente se dependía exclusivamente de las fibras encontradas en la naturaleza, las cuales gracias a sus excelentes cualidades, han expandido su gama de utilización.

3.2 Clasificación de las fibras

Básicamente las fibras se clasifican en tres grupos, los cuales son: Fibras naturales, artificiales y sintéticas. Esta clasificación aparece esquematizada en la Figura 3.1.

Las **fibras naturales** son las derivadas de la naturaleza, y pueden ser de procedencia animal, vegetal o mineral. Ejemplos de ellas son las fibras de lechuguilla, el maguey, el asbesto, etc.

La principal ventaja de estas fibras también conocidas como "fibras no procesadas", es que con ellas se pueden obtener materiales reforzados a un bajo costo, empleando las técnicas adecuadas para su obtención.

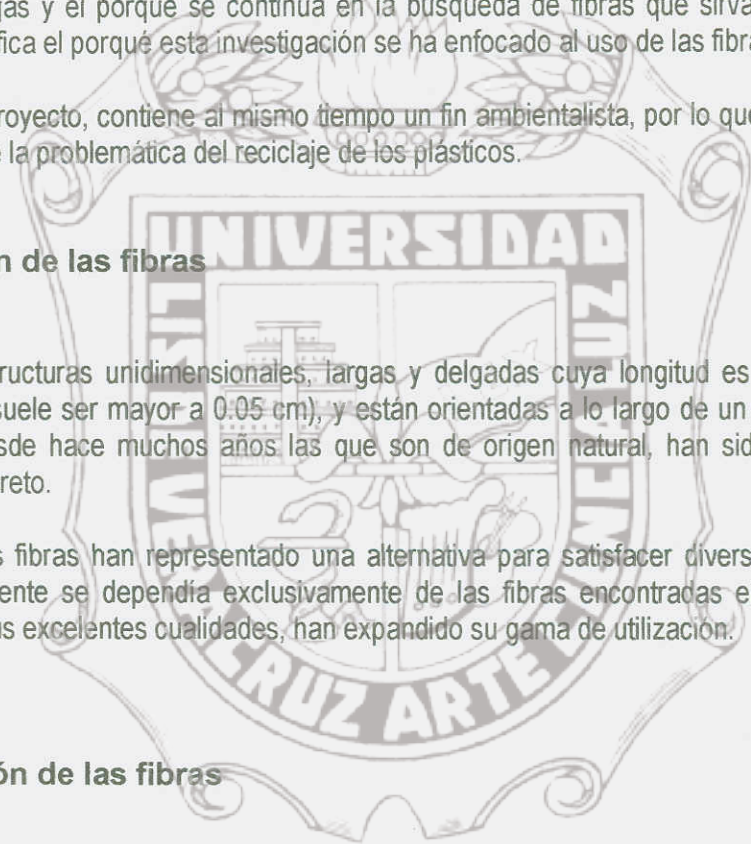
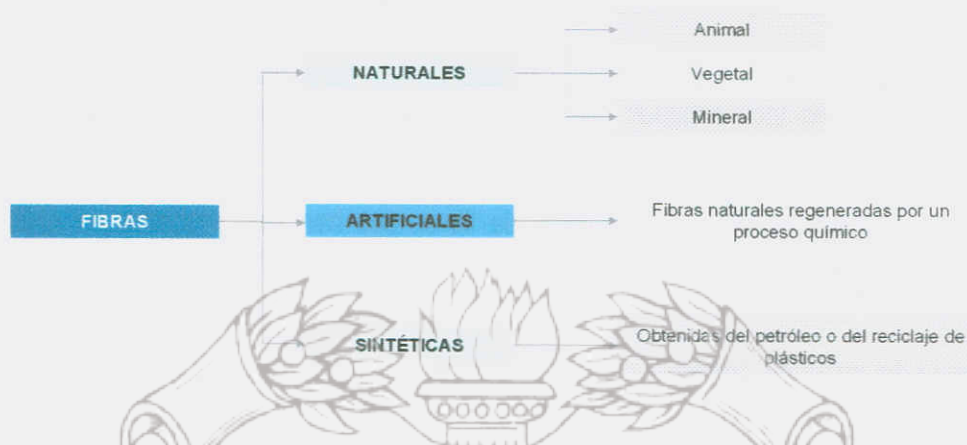


Figura 3.1. Clasificación de las fibras.



Aunque históricamente muchas fibras han sido usadas para reforzar los materiales de construcción, ha sido hasta años recientes que se han realizado estudios de la aplicación de las fibras naturales como refuerzo.

Las fibras de asbesto han formado parte de las técnicas de refuerzo para concretos pero su inconveniente es que aumentan la relación agua-cemento debido a que absorben grandes cantidades de agua.

Dentro de las fibras naturales, las de origen mineral actualmente se aplican como refuerzo en el concreto, ejemplos de ellas son las fibras de acero y las fibras de carbono, sin embargo, la principal desventaja que presentan es su alto costo, a diferencia de las fibras naturales de origen vegetal las cuales suelen ser muy económicas.

A pesar de que las fibras vegetales están disponibles en grandes cantidades, y en muchos países en desarrollo representan una fuente renovable continua, presentan algunos inconvenientes como el clima o que ciertas condiciones ambientales adversas puedan limitar su producción.

Asimismo, otro de los inconvenientes de las fibras naturales es que la mayoría de ellas como el algodón y lana sufren la carencia de durabilidad al ambiente alcalino de la pasta del cemento Portland.

Las **fibras artificiales** son producidas a partir de elementos naturales pero han sido regeneradas mediante algún proceso químico, por lo que son más uniformes y resistentes a roturas, al fuego y a las arrugas que las fibras naturales. Ejemplo de éstas son el acetato, la viscosa, el rayón y la seda artificial.

Con el tiempo las limitaciones de las fibras naturales y artificiales, dieron origen a las **fibras sintéticas**, cuyo objetivo principal ha sido mejorar las características de las fibras naturales. A medida que sus aplicaciones han ido en aumento, se han convertido en una necesidad, principalmente porque el crecimiento de la población demanda cada vez más servicios.

Estas fibras se obtienen a partir de resinas derivadas del petróleo, pero recientemente se han empezado a obtener del reciclaje de productos plásticos, con lo que su popularidad ha crecido en los últimos años, ejemplos de ellas son el acrílico, el nylon, poliestireno, polipropileno, etc.

Se han probado el polietileno, el nylon y el poliéster, de las cuales el nylon es la que presenta un mejor desempeño, ya que por su textura es más fácil de manejar que las demás fibras. Sin embargo, aunque estas fibras han sido eficientes y presentan algunas mejoras tienen una desventaja, la cual consiste en una tendencia a la segregación de las superficies.

La principal ventaja de este tipo de fibras es principalmente que no se depende de cosechas y el volumen de producción puede ser modificado a voluntad. Sus propiedades también pueden ser modificables a voluntad, así como su resistencia, aunque la mayoría presentan algunas desventajas como la absorción de agua.

Dentro de la amplia gama de las fibras sintéticas, se ha comprobado que las fibras PP (abordadas en esta investigación) son impermeables y no tienen absorción de agua, lo que ayuda mucho en el diseño de la mezcla de concreto debido a que no hay que corregir la relación a/c por absorción, lo que las hacen muy compatibles para mezclarse en matrices de concreto. Adicionalmente a estas propiedades son: químicamente inertes, muy estables y livianas, lo que no incrementa sustancialmente el peso de la mezcla de concreto.

Actualmente, los avances tecnológicos y con ello las exigencias en la modernidad requieren cada vez el mejoramiento de los materiales y sistemas constructivos empleados. Esta es la línea de investigación que sigue la tesis.

Lo ideal sería contribuir a la solución de los graves problemas de generación de basura que afectan a las principales ciudades del mundo, por medio del aprovechamiento de nuevos productos a través del reciclaje.

Pues al buscar mejorar un material tradicional como el concreto con aditivos provenientes de residuos plásticos reciclados, se atacan al mismo tiempo dos problemas y los resultados obtenidos pueden ser aún más interesantes.

Cabe destacar que desde hace algunos años han aparecido en el mercado productos fabricados con materiales del reciclaje de plásticos, los cuales han ido penetrando el mercado contemporáneo. Algunos de estos materiales son fibras sintéticas cuya aplicación en los sistemas constructivos se han incrementado en los últimos años en diversos países Sudamericanos, Estados Unidos, Canadá y Europa.

Con el desarrollo de las fibras sintéticas, la industria de la construcción se ha visto beneficiada con su incorporación para mejorar las mezclas de concreto.

Es por esto que en relación al objeto de estudio de la investigación, se considera conveniente mencionar cuales son las aplicaciones de las fibras sintéticas obtenidas a partir del reciclaje, para ubicar al lector en la importancia del uso de las mismas dentro de la presente investigación, debido a que este tipo de fibras pueden ofrecer ciertas novedades en el ámbito de la construcción.

3.3 Fibras naturales

Dentro de la amplia gama de fibras naturales, las que se aplican actualmente como aditivos para el concreto son las de origen mineral, como son las fibras de acero, carbono y la tradicional fibra de vidrio.

3.3.1 Fibras de acero⁹

Se utilizan en elementos de concreto, para sustituir el acero de refuerzo convencional en pisos y pavimentos. Lo refuerzan proporcionándole una gran resistencia a agrietamiento, fragmentación, astillado y desgaste, así como una mayor resistencia a las fuerzas de tensión y de flexión.

Al reforzar un concreto con fibras de acero, estas actúan como pequeñas barras de refuerzo, atravesando las grietas y soportando una carga entera aún más grande que la que se necesita para romper una viga.

El incremento en la resistencia depende del espacio entre las fibras (número de fibras por volumen), del grado de adhesión con la mezcla (geometría y deformación de las fibras) y del área de superficie de la fibra.

Las dimensiones nominales de las fibras estándares son de: 0.25 x 0.69 x 19.00 mm y de 0.25 x 0.56 x 25.00 mm, se fabrican con una tolerancia de 0.002 pulgada.

3.3.2 Fibras de carbono¹⁰

Los productos para reforzamiento estructural comprenden láminas y mantas de fibra de carbono, las cuales son adheridas con resinas epoxicas de propiedades especiales. Estos refuerzos adheridos externamente a las estructuras de concreto, madera o metal, han demostrado su eficacia, debido a su extremada resistencia a la tensión.

Las láminas de fibra de carbono se utilizan especialmente para aumentar la resistencia a la flexión, mientras que las mantas se utilizan con bastante éxito para aumentar la resistencia a cortante. Son muy fáciles de colocar y no requieren personal especializado para dicho trabajo.

El beneficio obtenido principalmente es el contar con un material liviano, que no se oxida y que es extremadamente resistente a la tensión. Para la colocación de los materiales de fibra de carbono, es necesario en la mayoría de los casos, someter previamente a la estructura de concreto a una prueba de adherencia, la cual de ser positiva, garantiza la correcta adherencia del refuerzo a la estructura; en caso contrario, se deberá optar por un sistema de reforzamiento distinto.

Finalmente el éxito del sistema depende de la adherencia del concreto-fibra, el manejo adecuado en los tiempos de espera entre una capa y otra, los espesores exactos de las capas y la presión aplicada, los cuales son los factores determinantes en la resistencia final del sistema.

La desventaja del mismo es que la protección y cuidadoso método de aplicación resulta costoso para el uso de una estructura común por lo que únicamente se ha aplicado a estructuras especializadas como los puentes.

3.3.3 Fibra de vidrio

Las mezclas de concreto con fibra de vidrio ofrecen una alta resistencia al fuego, a la corrosión y al ataque biológico de microorganismos, sin importar las condiciones ambientales a las que se someta.

Estas mezclas se utilizan para fabricar armazones de apoyo que soporten cargas directas, vigas, columnas, muros principales de carga, losas de entrepisos, techos, cascos marinos, contenedores de agua, en lugares donde el material está sujeto a esfuerzos prolongados de carga y en otros donde pudieran existir riesgos para la vida del ser humano.

Es un material de revestimiento para el concreto que resiste el paso del agua, lo que lo vuelve idóneo para usarse en piscinas y tanques.

3.3.4 Comparación de los tipos de fibras

Como se ha descrito anteriormente, no todas las fibras son iguales, cada una tiene sus pro y sus contra. El vidrio es la fibra más conocida debido a su bajo costo, aunque puede parecer extraño que el vidrio sea usado como refuerzo, cuando es realmente tan fácil de romper. Sin embargo, si por alguna razón, el vidrio es transformado en fibras diminutas, se comporta de modo muy distinto, sus fibras son resistentes y flexibles.

Aún así, existen fibras más resistentes todavía, lo cual es excelente porque a veces el vidrio no es lo suficientemente resistente y duro. De acuerdo a la finalidad de uso, es el tipo de fibra apropiado que se debe utilizar. Si no interesa el costo, se pueden usar fibras más resistentes, pero mucho más caras, como las fibras de carbono o de acero.

Asimismo, las fibras de acero presentan dos desventajas, la primera consiste en que son abultadas y requieren especial cuidado durante el proceso de mezclado, ya que de no mezclarse correctamente con el concreto, estas formarán grumos, produciendo un producto final inaceptable; el segundo inconveniente es cuidar que las fibras de acero no sean afectadas por la composición química del concreto de tal forma que sean susceptibles de sufrir corrosión.

En general, cuando se tiene que decidir sobre el uso de un aditivo en el concreto, el costo es un factor primordial, por lo que las fibras de carbono solamente se emplean en obras especializadas y es necesario buscar otro tipo de fibras que sea resistentes y a la vez económicas. Con esta finalidad se desarrollaron las fibras sintéticas, cuyas aplicaciones como aditivo a las mezclas ya han sido probadas en algunos países.

En cuanto al uso de fibras PP estas tienen varias ventajas mencionadas anteriormente que las hace ideales para su adición al concreto, razón por la cual la investigación se ha enfocado al estudio de este tipo de fibras sintéticas.

3.4 Aplicaciones de Fibras Sintéticas⁹

Del reciclaje de los tipos más comunes de plásticos, se obtienen diversas fibras sintéticas, las cuales pueden utilizarse como aditivos a las mezclas de concreto hidráulico, con el fin de incrementar su resistencia.

Estas fibras se producen por el estiramiento o extensión axial del polímero sintético, los cuales pueden ser cortados en forma de filamentos a la longitud deseada.

Algunas de las fibras que más comúnmente se fabrican son:

3.4.1 Aditivo de poliestireno

Para la fabricación de concreto ligero, se utilizan las esferas de poliestireno expandido llamadas Styrencret, las cuales están recubiertas con un aditivo especial que mejora su adherencia con el concreto.

Estas esferas se distribuyen homogéneamente, obteniéndose un concreto ligero con propiedades termoacústicas que puede llegar a pesar hasta una quinta parte de su peso normal, lo que reduce el diseño de las secciones de los elementos estructurales.

Además, es impermeable y no es atacado por animales y microorganismos. Una vez endurecido el elemento, se puede clavar y taladrar con herramientas tradicionales, ya que no transmite vibración alguna.

Por sus propiedades de ligereza, se utiliza en proyectos de nivelación de pisos, losas y azoteas, en la reconstrucción de casas y edificios que requieren un mínimo de aumento de carga, en capas de compresión, en losas aligeradas con casetones de poliestireno o block, en sistemas con paneles de poliestireno o de poliuretano, en la construcción de obras marítimas y en la fabricación de plataformas flotantes y muelles.

3.4.2 Fibras de polipropileno

Se obtienen a partir de la polimerización de los gases del propileno y etileno.

Estas fibras se caracterizan por su resistencia a la humedad y a los productos químicos. Además, su gravedad específica es más baja que todas las demás fibras.

Sus aplicaciones fuera de la construcción van desde productos disponibles de la higiene como son pañales de bebé, productos del cuidado femenino, ropa de deporte, calcetines, alfombras, cubiertas de tapicería, etc. Por estas cualidades las fibras PP son consideradas como la fibra más amistosa en la ropa del mercado.



Como aditivos en algunos países se les emplea como un refuerzo tridimensional en el concreto ayudando a disipar los esfuerzos dentro de su masa.

Son fibras de color blanco, y están disponibles en longitudes de 13, 32 y 51 mm (1/2", 1 1/4" 1 1/2"). Su envase son bolsas de polietileno de 600 gramos y no afectan o interfieren en lo absoluto con aditivos químicos.

De las fibras antes mencionadas se desprende el título de la tesis: **Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y la resistencia del concreto en**

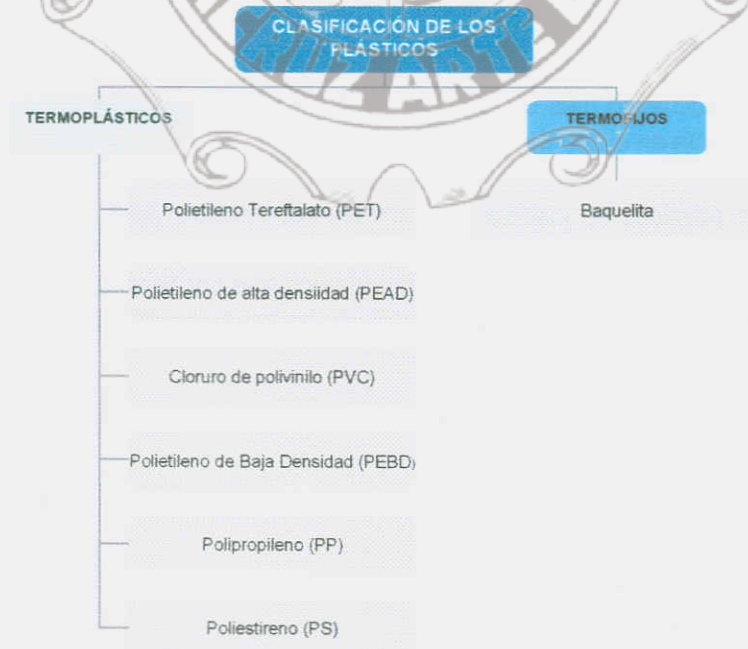
Imagen 3.1. Fibras de polipropileno pavimentos portuarios de Veracruz.

3.5 Obtención de Fibras Sintéticas a partir de plásticos reciclados

3.5.1 Clasificación de los plásticos

Existen distintos criterios para clasificar los plásticos, tal y como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Clasificación de los plásticos más comunes.



Por su capacidad para volver a ser fundidos mediante el uso de calor, los plásticos pueden clasificarse en termofijos y termoplásticos. Los primeros, son plásticos que una vez moldeados no pueden modificar su forma, en cambio los termoplásticos pueden ser procesados varias veces y su uso es más extendido que los termoestables.

Dentro de los termoestables, los más comunes son el PET de los envases de bebidas, el PVC de tuberías, envases de aceite y bebidas sin gas, y el PEBD de bolsas de leche.

3.5.2 Reciclaje y reutilización

Si bien existen más de cien tipos de plásticos, los más comunes son sólo seis, y se les identifica con un número dentro de un triángulo a efectos de facilitar su clasificación para el reciclado (Tabla 3.1), ya que las características diferentes de los plásticos exigen generalmente un reciclaje por separado¹¹.

La clasificación previa y la recolección diferenciada es el primer paso en el camino hacia la recuperación de plásticos. A efectos de reducir significativamente los costos, la clasificación debe realizarse en los lugares en los que se genera el desecho, como hogares, centros educativos, centros de salud, oficinas, etcétera.

Son muchas las experiencias de recuperación de plásticos que hace años se desarrollan tanto en México como en otros países del mundo. Por ejemplo bolsas, caños y mangueras, baldes, cerdas para cepillos y escobas, hilo para la industria textil, láminas, útiles escolares, muebles, piezas de máquinas y vehículos, relleno asfáltico y bancos.

Cuando se requiere reutilizar plásticos que proceden de uso doméstico son necesarias dos condiciones básicas: la limpieza meticulosa de los plásticos y una correcta y eficaz clasificación de cada tipo de ellos. Con esta finalidad, la Tabla 3.1 describe los principales usos y aplicaciones de los 6 tipos de plásticos más comunes.

Actualmente el procedimiento más extendido del reciclaje de plásticos se basa en la elección manual, fijándose principalmente en el tipo de recipiente, color y forma.

El reciclaje de los plásticos se justifica por razones económicas, pues a medida que aumentan los costos de las materias primas más interesa el empleo de las recicladas, con la finalidad de lograr ahorros importantes de materia prima y energía, además que por razones ambientales es conveniente el empleo de productos reciclados para evitar la acumulación de los mismos.




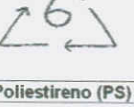
TIPO	CARACTERÍSTICAS	USOS Y APLICACIONES
 Polietileno Tereftalato (PET)	Se produce a partir del Acido Tereftálico y Etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella. Para el grado botella se debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos.	Envases para gaseosas, aceites, agua mineral, cosméticos, frascos varios (mayonesa, salsas, etc.), envases al vacío, bolsas para horno, bandejas para microondas, cintas de video y audio, geotextiles (pavimentación /caminos); películas radiográficas.
 Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	Es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural). Es muy versátil y se le puede transformar de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión o Rotomoldeo.	Envases para: detergentes, aceites automotor, shampoo, lácteos, bolsas para supermercados, cajones para pescados, gaseosas y cervezas, baldes para pintura, helados, aceites, tambores, caños para gas, telefonía, agua potable, drenaje y uso sanitario, macetas y bolsas tejidas.
 Cloruro de Polivinilo (PVC)	Se produce a partir de gas (43%) y sal común (57%) Se obtienen productos rígidos o totalmente flexibles (Inyección-Extrusión-Soplado).	Envases para agua mineral, aceites, jugos, mayonesa. Perfiles para marcos de ventanas, puertas, caños para desagües domiciliarios y de redes, mangueras, blister para medicamentos, pilas, juguetes, envolturas para golosinas, cables, papel vinílico (decoración), bolsas para sangre.
 Polietileno de Baja Densidad (PEBD)	Se produce a partir del gas natural, al igual que el PEAD es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión y Rotomoldeo.	Bolsas de todo tipo, envasamiento automático de alimentos y productos industriales (leche, agua, plásticos, etc.), base para pañales descartables, bolsas para suero, contenedores herméticos domésticos. Tubos y pomos, tuberías para riego.
 Polipropileno (PP)	El PP es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. El PP es un plástico rígido de excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.), se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería.	Película/Film, bolsas tejidas (para papas, cereales), envases industriales, cordeles, caños para agua caliente, jeringas descartables, tapas en general, envases, cajones para bebidas, baldes para pintura, helados, botes para margarina, fibras para tapicería, cubrecamas, etc., Telas no tejidas (pañales descartables).
 Poliestireno (PS)	Es un polímero de estireno monómero con oclusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto.	Botes para lácteos, helados, dulces, etc. Envases varios, vasos, bandejas de supermercados y rotiserías. Heladeras: contrapueras, anaqueles. Cosmética: envases, máquinas de afeitar descartables. Bazar: platos, cubiertos, bandejas, etc. Juguetes, cassetes, etc.

Tabla 3.1. Clasificación de los plásticos¹¹.

3.6 Estado del arte de la temática que se propone

El uso de fibras en la construcción no es un concepto nuevo, innumerables evidencias arqueológicas dan fe de que en Babilonia y Egipto las fibras vegetales se combinaron con mezclas de arcilla para fabricar elementos estructurales. Con el paso del tiempo esta técnica cayó en desuso, hasta que ya muy entrado el siglo XX se retomó, primero con un enfoque empírico y más tarde bajo la lente de la investigación.

Instituto de Ingeniería
 Universidad Veracruzana

Históricamente, las fibras naturales han sido usadas para reforzar diferentes tipos de materiales de construcción. El concepto de las fibras en materiales de construcción es muy antiguo, como ejemplo se tienen las fibras de paja en el adobe con lo cual se podía mejorar la resistencia al agrietamiento y a la fragmentación, el pelo de animales como el caballo en revoque, el asbesto en el cemento, etc.

Sin embargo, a partir de que las fibras de asbesto fueron relacionadas con potenciales peligros para la salud, se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionaran al concreto las propiedades tan favorables que el asbesto le daba, además de ser competitivos en calidad y precio.

Desde 1847 se inició con un estudio técnico, sobre la adición de fibras de hierro, yute y otras fibras naturales al concreto. El estudio se desarrolló lentamente y fue hasta 1960 que se comenzó a experimentar con el uso de fibras metálicas y fibra de vidrio.

A finales de los años 60's, se llevó a cabo en otros países una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los compuestos formados por estas fibras con el cemento. Los resultados de las investigaciones encontraron que las fibras pueden ser usadas con éxito para fabricar materiales de construcción. Posteriormente se desarrollaron procesos de manufactura apropiados para su producción comercial en varios países de América Central, África y Asia.

Aunque los resultados fueron alentadores, se encontraron algunas deficiencias respecto a la durabilidad de las fibras naturales. Estas al parecer son resultado de la reacción entre la alcalinidad de la pasta de cemento y las fibras, además de la susceptibilidad al ataque de microorganismos en presencia de la humedad, por lo que se comenzó a optar por el potencial empleo de las fibras sintéticas.

Sin embargo, no fue hasta 1971 cuando en Estados Unidos se hicieron los primeros estudios e investigaciones dirigidos al uso del concreto consolidado con fibras sintéticas, las que desde entonces han sido elementos indispensables en la construcción de pisos industriales de alto desempeño, pavimentos, cubiertas para puentes, concretos lanzados para la estabilización de taludes, revestimientos de túneles, elementos estructurales prefabricados, bóveda, etc.

Posteriormente, el desarrollo de proyectos de reforzamiento estructural con fibras de carbono, obedece a la investigación en el campo de las estructuras en los años ochenta.

La aplicación de estas fibras para el concreto ha sido un éxito, actualmente en Perú han sido empleadas para reforzar columnas de puentes colgantes, aplicando las películas de carbono en las caras de las columnas. Sin embargo, una desventaja es que necesitan la aplicación de un recubrimiento denominado Top Coat, cuya finalidad es proteger las fibras de los rayos solares, lo que representa un costo elevado para la obra.

Muchos tipos de fibras se han probado, la gama ha sido amplia y extensa. La ex Unión Soviética probó sin éxito a largo plazo las fibras de cristal. El nylon y el rayón también fueron probados pero no resolvieron las características de funcionamiento requeridas para el refuerzo del concreto.

En los últimos años nuevas investigaciones han abierto la posibilidad de utilizar otros materiales como son las microesferas de poliestireno, la fibra de vidrio, el polipropileno y los polímeros, los cuales

pueden agregarse al concreto en la planta dosificadora o bien en la revolvedora cuando ésta haya llegado a la obra, después de que se obtiene el revenimiento.

De esta manera entramos al concepto de los concretos fibroreforzados, los cuales se pueden definir como concretos hechos de cemento con conteniendo finos, o finos y agregado grueso y una serie de fibras discontinuas.

Actualmente las fibras de polipropileno son empleadas ampliamente en los Estados Unidos y Canadá en todo tipo de construcciones de concreto¹².

Otros países como Argentina y Chile, continúan realizando investigaciones sobre el comportamiento en el laboratorio de concretos reforzados con fibras (acero y sintéticas)¹³.

Chile ya ha aplicado las fibras de acero a la construcción de estabilización de taludes, pavimentos en carreteras, pistas de Aeropuertos y Hangares, pistas industriales y comerciales, cimentaciones para equipo y maquinaria, etc¹⁴.

Brasil es otro de los países Sudamericanos que emplea el uso de fibras PP en diversos sectores de la construcción, y cuenta con la mayor fábrica de América del Sur que produce este tipo de fibras (FITESA)¹⁵, empresa que produce alrededor de 11,000 ton de fibras de polipropileno al año.

Colombia es uno más de los países de América del Sur que realiza investigaciones sobre concretos reforzados con fibras sintéticas.

En Europa, países como España también utilizan la gama de fibras de polipropileno para refuerzo y prevención de las fisuras por retracción de yesos, morteros y concretos¹⁶.

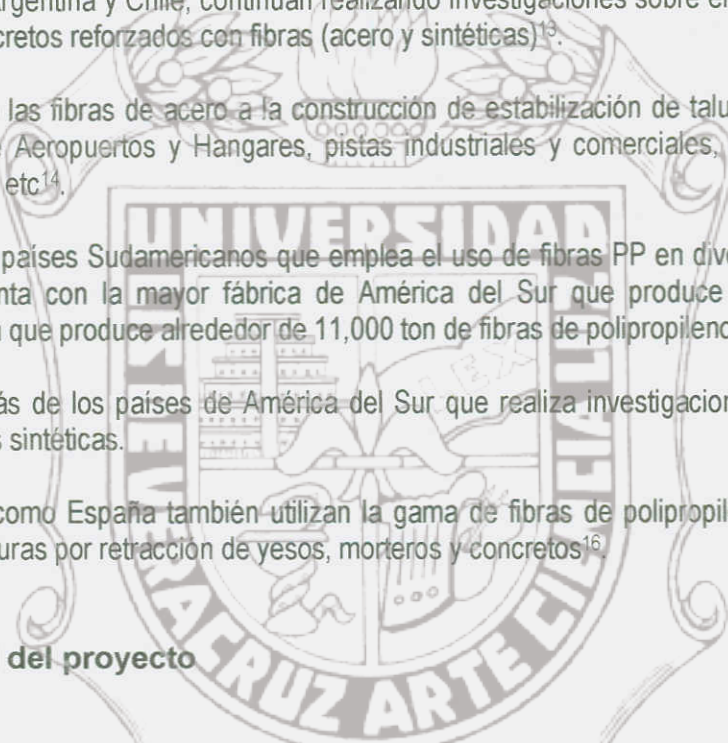
3.7 Originalidad del proyecto

A pesar de que el empleo de las fibras se realiza en la mayor parte de Sudamérica, Estados Unidos y Canadá; en México apenas comienza su uso. En el mercado nacional existen 5 compañías que distribuyen las fibras de polipropileno: Fibermesh, Fiberstrand 100, Fibercreto, Dificon y Sika.

La originalidad del proyecto radica en la oportunidad que se tiene de aprovechar las experiencias y conocimientos de otros países en materia de concretos reforzados con fibras sintéticas y fibras naturales, buscando su aplicación en estructuras susceptibles de sufrir corrosión.

La importancia del proyecto consiste en buscar el desarrollo de un nuevo material para mejorar un material tradicional como el concreto, y que al mismo tiempo satisfaga los requerimientos técnicos y económicos, lo cual es una tarea difícil de conseguir.

Por otra parte, cabe señalar que no se han detectado hasta el momento proyectos similares, pues aún cuando existen normas americanas y japonesas sobre compuestos reforzados con fibras y métodos de ensayos, una limitante de su empleo en México se debe a que no existe una metodología para la dosificación de las fibras PP.



Por ello cuando las fibras PP cuando se les emplea para el control de grietas, se realiza bajo consumo empírico o bien se tiene que basar en la dosificación dada por cada fabricante, la cual varía de 600 gramos a 1 kg de fibra por m^3 de concreto, además de que su aplicación se restringe a pisos y pequeñas estructuras.

Sin embargo, la base de determinación de estos valores tiene metodologías distintas, lo que refleja la ausencia de una estandarización en la metodología de las personas enfocadas en el tema, debido a que no existe un estudio formal que determine el comportamiento de este tipo de fibras, el cual es prácticamente nuevo.

No obstante el volumen de fibras PP adicionada a la mezcla de concreto debe ser tal que pueda ser posible un incremento en sus propiedades mecánicas, sin exceder un volumen crítico que afecte la trabajabilidad.

El objetivo de la investigación contempla el uso de concretos fibroreforzados con aplicación en pavimentos portuarios, en busca de mejorar problemas de agrietamiento, para evaluar la factibilidad de sustitución de la malla electrosoldada por un porcentaje adecuado de fibras PP, avalando esto mediante un análisis experimental de mezclas de concreto en el laboratorio y modelos de simulación por medio de la computadora, que representen el comportamiento de los pavimentos.

Finalmente se busca determinar la economía del material. La incógnita es qué tanto es capaz de incrementarse la resistencia del concreto con la adición de este tipo de fibras.

A pesar de que estos sistemas constructivos ya se aplican en muchos países, en México hace falta una unificación de criterios referentes a la dosificación en el empleo de este tipo de aditivos.

Al margen de los sistemas constructivos tradicionalmente empleados, es importante observar las condiciones de evaluación, referidas a la relación existente entre la cantidad de fibras aplicadas a la muestra y el incremento en caso de haberlas de sus propiedades físicas.

Así como determinar la cantidad óptima por adicionar para que mejore sus propiedades y al mismo tiempo sea económicamente factible para aplicarla en pavimentos portuarios.

El conjunto de fibras sintéticas que actualmente existen en el mercado, así como su obtención a través del reciclaje de plásticos justifica el enfoque de la investigación.

Por último cabe destacar que como la resistencia del concreto no depende solamente de la adición de fibras PP, sino de la relación agua-cemento así como de otras variables como lo son los agregados, se tiene contemplado un análisis de laboratorio completo, desde el diseño de la mezcla hasta la elaboración de los modelos de simulación de losas.

3.8 Limitación de responsabilidades

El contenido de esta investigación refleja las opiniones del autor, quien es responsable de los hechos y la exactitud de los datos presentados, sin embargo este documento no constituye una guía de especificaciones ni tampoco proporciona instrucciones detalladas para la realización de actividades específicas relacionadas con la construcción. No constituye una norma, especificación ni regulación, por lo que no debe usarse como sustituto de una especificación de proyecto. Los requisitos específicos de los planes y especificaciones para un proyecto tienen prioridad ante el contenido de este documento.





SEGUNDA PARTE. PLANTEAMIENTO Y
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 4. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN
Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 El contexto en el Puerto de Veracruz

4.1.1 Localización

Como se mencionó anteriormente, el estudio se lleva a cabo en el Puerto de Veracruz, ubicado en la zona centro oriental del Golfo de México, a 109 Km de su capital, la ciudad de Xalapa. Se le considera el principal puerto de altura de nuestro país.

Figura 4.1. Localización del puerto de Veracruz.



Se encuentra a 10 m.s.n.m, contando con una extensión de 241 km² (lo que representa el 0.33% del total del estado). Limita al norte con La Antigua; al este, con el Golfo de México; y al sur, con Manlio Fabio Altamirano.

4.1.2 Turismo

Veracruz tiene en el arte y la cultura una de sus mejores formas de expresión. El trabajo artístico de sus antepasados se distingue por la riqueza de las construcciones antiguas.

En la ciudad, el turismo representa una importante fuente de actividades para el desarrollo económico y social. Sin duda, es una magnífica oportunidad para la inversión local y extranjera. La belleza natural del puerto, los monumentos históricos, la alegría y hospitalidad de los veracruzanos, hacen de él un destino turístico por



Imagen 4.1. El puerto de Veracruz. excelencia.



Imagen 4.2. Zona hotelera del puerto.

La ciudad cuenta con una vasta infraestructura hotelera y sus playas tienen una gran afluencia de turistas nacionales.

Debido a esto anualmente se construyen numerosos hoteles y otras construcciones con finalidad de dar cabida a los turistas que visitan la ciudad. Asimismo, se nota el mantenimiento que se le imparte a otros tantos edificios ya existentes.

El caminar por los portales y el malecón da una idea de la calidez de los porteños, lo que aunado a los atractivos con los que cuenta la ciudad lo han convertido en uno de los principales destinos turísticos de México.

4.1.3 Carreteras

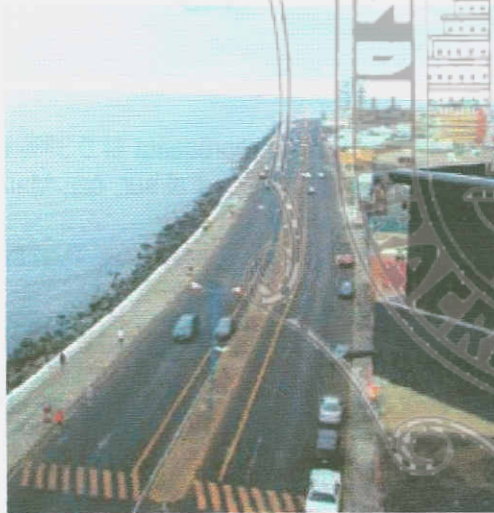


Imagen 4.3. Carreteras y accesos.

Si a esto le agregamos que cuenta con una amplia vías de comunicaciones, es claro el porque anualmente recibe gran cantidad de turistas en sus playas. Por carretera se puede llegar por las autopistas México-Puebla-Xalapa o bien por la México-Orizaba-Veracruz y por el norte del estado vía Tulancingo-Huauchinango-Poza Rica.

La red carretera ha convertido este bello puerto en uno de los más visitados, puesto que las distancias de las ciudades que colindan con él, no son considerables, ya sea desde la Ciudad de México, Puebla, Tlaxcala o Oaxaca llegar a Veracruz es sumamente sencillo.

4.1.4 Zona Portuaria



Imagen 4.4. Zona portuaria.

En cuanto a operación portuaria Veracruz ofrece rutas que facilitan el comercio marítimo a Europa y al este de los Estados Unidos, operando como puerto de altura y cabotaje.

Actualmente, moviliza más de 14.0 millones de toneladas, es decir el 23.6 % del movimiento de carga comercial nacional.

Sin embargo, a pesar de su excelente ubicación comercial y todos los beneficios que recibe, cuenta con un gran problema, los altos índices de salitre y corrosión que se encuentran presentes en su medio ambiente, lo cual año con año ocasiona serios problemas a las estructuras cualquiera que sea el tipo.

Como es lógico pensar entre más cercanas al mar se encuentren las estructuras, mayor es el efecto negativo que se produce sobre ellas, por lo que principalmente en la zona portuaria ya se han empezado a tomar algunas medidas para contrarrestarlos.

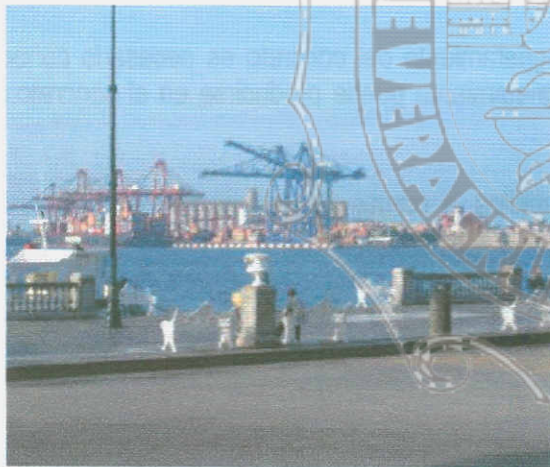


Imagen 4.5. Malecón.

Muchos de estos problemas tienen su origen en el agrietamiento del concreto, ya que por su naturaleza, el concreto es un material muy bueno para cargas de compresión, pero su resistencia a la tensión es relativamente baja (aproximadamente 10 al 15% de su resistencia a la compresión)¹⁷, siendo esta una de las principales causas de fisuramiento durante el proceso del asentamiento plástico.

Independientemente del punto de la estructura en que se generen las grietas, éstas se convierten en un problema cuya reparación es costosa y molesta; si adicionalmente la estructura se encuentra cerca del mar, el agrietamiento facilita la entrada del salitre y como consecuencia viene la corrosión del acero de

refuerzo.

Por esta razón la investigación busca disminuir los problemas del concreto para ofrecer una mayor durabilidad a las estructuras construidas cerca del mar, en especial los pavimentos.

4.2 Planteamiento del problema

4.2.1 El agrietamiento del concreto y su repercusión en las estructuras

Las estructuras de concreto reforzado tienen ciertas características, derivadas de los procedimientos constructivos usados en su fabricación, que las distinguen de las estructuras de otros materiales¹⁸.

Toda persona relacionada con el área de la construcción sabe que el concreto por naturaleza tiende a agrietarse, los efectos de este fenómeno pueden ser desde pequeñas molestias hasta convertirse en toda una pesadilla.

El concreto se fabrica en estado plástico, lo que aporta la gran ventaja de ser moldeable, pero al mismo tiempo exige ciertas restricciones. Las principales restricciones en las losas de concreto de los pavimentos son:

- a) Superficie de contacto del concreto con la cimbra
- b) Acero de refuerzo
- c) Elementos empotrados

Para poder encontrar una solución al problema de agrietamiento del concreto es necesario conocer cuales son las causas que lo provocan, ya que el agrietamiento puede producirse en el concreto en estado plástico y/o en el concreto endurecido.

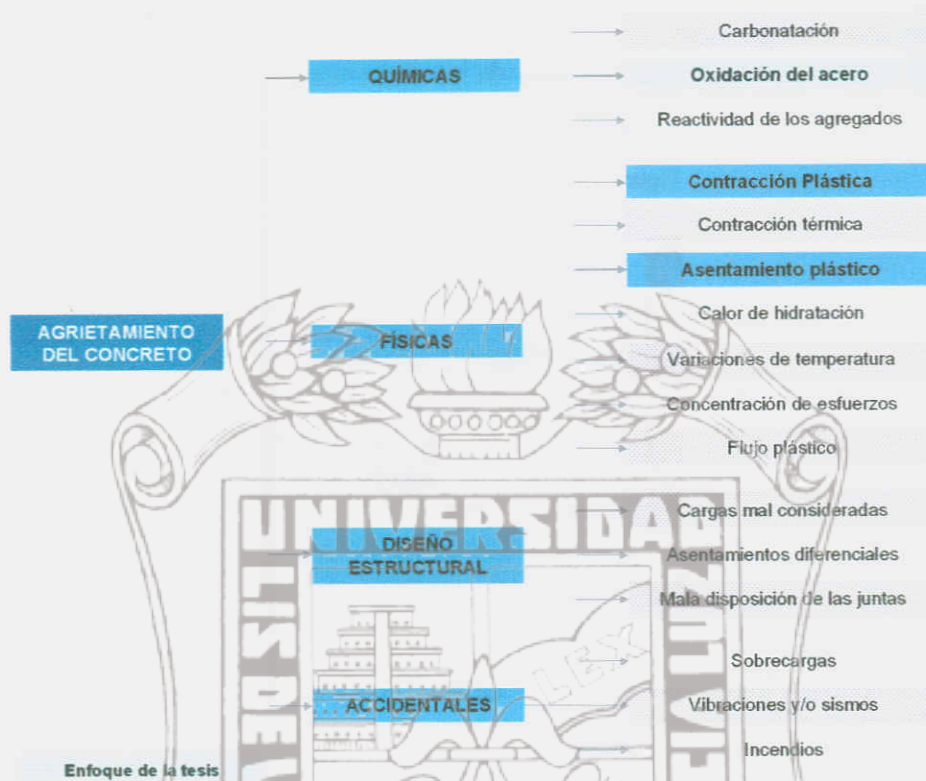
En general, los elementos de concreto reforzado sujetos a cargas de trabajo generalmente se encuentran agrietados en las zonas en que actúan esfuerzos de tensión¹⁸.

Las grietas que se produce en el concreto en estado plástico se deben básicamente a lo siguiente:

- Contracción del concreto por asentamientos alrededor del refuerzo
- Contracción plástica (durante el fraguado)

En el concreto en estado endurecido el agrietamiento puede deberse a diversas causas químicas, físicas, de diseño estructural y/o causas accidentales, tal y como se muestra en la Figura 4.2.

Figura 4.2 Causas que originan el agrietamiento del concreto.



Por lo tanto, la investigación busca el mejoramiento de las mezclas de concreto al agrietamiento evitando así los problemas ocasionados por la oxidación del acero de refuerzo, evaluando la posibilidad de sustituir el refuerzo de la malla electrosoldada por fibras sintéticas.

a) Agrietamiento en estado plástico

Básicamente el origen de las grietas se debe a la restricción de todas las partes de la mezcla de moverse cuando el concreto se expande o se contrae debido a los cambios de temperatura, es decir, estos cambios de volumen provocan deformaciones diferenciales, las cuales dependen de las cargas y de las condiciones de apoyo de la estructura.

Estas deformaciones inducen la existencia de esfuerzos de tensión que en un momento determinado exceden la baja resistencia del concreto, a estos esfuerzos.

Las grietas pueden formarse por contracción plástica, por la colocación de una junta inapropiada, por la falta de una junta, por congelación y deshielo, por asentamiento, etc., tal y como se muestra en la Figura 4.2.

Sin embargo en pavimentos, básicamente existen dos tipos de grietas importantes: **Grietas por Asentamiento Plástico** y **Grietas por Contracción Plástica**.

Las grietas por asentamiento plástico se forman por la tendencia del concreto después de la colocación, el vibrado y el curado, a consolidarse y por las restricciones que le impone el acero de refuerzo. Estas restricciones pueden traer como consecuencia la existencia de vacíos bajo las barras de acero de refuerzo y/o la formación de grietas alrededor de los elementos que restringen el movimiento, como se aprecia en la Figura 4.3.

Figura 4.3 Grietas por asentamiento plástico.



En cuanto a la formación de las grietas por contracción plástica, estas aparecen en ocasiones, en la superficie del concreto fresco, poco después de colocado y cercano al tiempo en que se realiza el acabado. Tienen su origen en la pérdida de agua por evaporación en la superficie del concreto, lo cual ocasiona esfuerzos de tensión en la capa superficial, que está restringida por el concreto interior no contraído, como se muestra en la Figura 4.4.

Este tipo de grietas ocurren generalmente cuando la evaporación es mayor que el sangrado. Es decir, aparecen debido a un cambio de volumen en la mezcla del concreto en estado plástico.

En el caso de los pavimentos, las grietas aparecen en la superficie de acabado por ser grandes áreas expuestas a la evaporación, lo que favorece la aparición de tales fisuras.

La longitud de las grietas por contracción plástica varía de unos cuantos centímetros hasta aproximadamente 1 m, pueden ser paralelas entre sí y generalmente se encuentran espaciadas siguiendo un patrón regular de 2 hasta 60 centímetros de distancia.

Figura 4.4 Grieta por contracción plástica.



A pesar de que este tipo de grietas empiezan en la superficie, generalmente son poco profundas y varían de 2 a 8 cm, sin embargo, existen casos en los que pueden sobrepasar todo el espesor de la losa del pavimento antes de que el concreto obtenga su resistencia de diseño.

Además, entre mayor sea el número de grietas y fisuras, será mayor la concentración de esfuerzos de tensión en los extremos del pavimento, lo que a su vez incrementa la cantidad de grietas.

El control del agrietamiento del concreto es de vital importancia, principalmente en elementos de concreto armado, ya que interfiere directamente con la durabilidad del sistema.

De acuerdo a la descripción anterior, este problema es difícil de controlar y a pesar de que no tienen un efecto directo, debido a que su naturaleza no es de tipo estructural, no suelen desaparecer cuando el concreto ha endurecido, por el contrario, se incrementan conforme el concreto continúa con su periodo de secado.

Aparte de ser antiestético, conviene limitar el agrietamiento de una estructura por dos razones: permite la entrada y difusión de la humedad, el oxígeno, las sales y otros químicos dañinos, los cuales son capaces de corroer el acero de refuerzo y al mismo tiempo, reduce la durabilidad y provoca un decremento de la vida útil de la estructura, la cual está limitada por su deterioro.

Esta situación constituye sin duda alguna un grave problema para las estructuras que se encuentran sumergidas y/o expuestas a la acción de la atmósfera marina.

b) Agrietamiento por la corrosión del acero y su efecto en las estructuras

El agrietamiento de una estructura no solamente se presenta en el concreto en estado plástico, también se presenta en estado endurecido. Dentro de las causas químicas (Figura 4.2) el principal motivo del agrietamiento del concreto es debido a los efectos de corrosión del acero de refuerzo y al impacto que el ambiente ejerce sobre la estructura.

Una de las causas principales de la corrosión del acero de refuerzo son los ataques de las sales, siendo el agrietamiento del concreto en estado plástico la puerta de acceso que facilita la entrada de agentes químicos dañinos a la estructura provocando el fenómeno de corrosión, lo que a su vez provoca más agrietamientos a la estructura, generando así un círculo vicioso entre ambos mecanismos de ataque.

Es decir, entre mayores son los agrietamientos del concreto en estado plástico, más agentes corrosivos pueden penetrar en la estructura. Al originarse el fenómeno de corrosión se producen mayores agrietamientos, con lo cual el problema se incrementa cada vez más.

La corrosión del acero de refuerzo por efectos del salitre en las estructuras de concreto, se manifiesta con particular severidad en las ciudades costeras, como el puerto de Veracruz, y principalmente en obras marítimas.



Imagen 4.6. Vista general del puerto de Veracruz.

El problema es tan grande que en las zonas cercanas al mar, “la sal se come el concreto” de las estructuras y deja expuesto el acero de refuerzo del mismo. Así, aún cuando no existan grietas formadas en estado plástico la corrosión se expande (ya que posee una menor densidad que el metal), produciendo agrietamientos o desprendimientos del recubrimiento del concreto de las barras de acero.

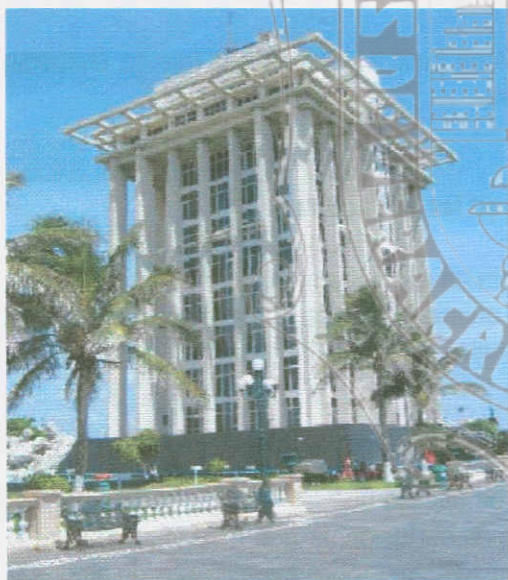


Imagen 4.7. Estructuras de concreto cercanas al malecón.

El acero, generalmente embebido en la estructura de concreto, está normalmente protegido en contra de la corrosión debido a la alta alcalinidad del concreto ($\text{pH} > 12.5$) y a la barrera física que existe entre el acero y los agentes externos del ambiente. Este estado del acero se denomina pasivo y su velocidad de corrosión es prácticamente nula.

Sin embargo, el ingreso de ciertos agentes agresivos del ambiente puede cambiar esta situación. Dos agentes que afectan seriamente la estabilidad de la película superficial del acero son los iones cloruro en ambientes marinos y el dióxido de carbono (CO_2) en ambientes urbanos, cuya entrada es más fácil si existen grietas previas en la estructura producidas en estado plástico del concreto.

Así, el acero pierde su estado pasivo y pasa al estado activo, en el cual es susceptible de sufrir corrosión.

En ambientes marinos, la principal causa del deterioro de las estructuras de concreto es la corrosión iniciada por iones cloruro. La exposición de las estructuras que han sufrido algún tipo de agrietamiento, al agua de mar, facilita la entrada a la brisa marina.

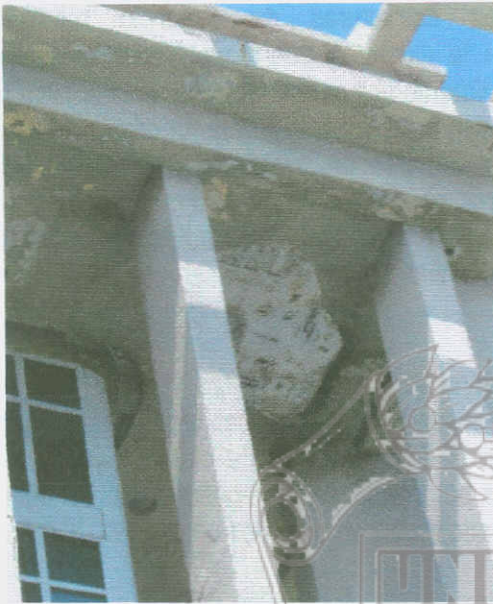


Imagen 4.8. Agrietamiento debido a los altos índices del salitre.

Otra de las causas es el empleo de agregados locales contaminados con sales, provocando la incorporación de estos iones al concreto, desintegrándolo y dejando expuesto el acero de refuerzo. Siendo, el efecto de la corrosión tan alto que ocasiona el deterioro de la estructura¹⁹.

En los últimos años, el deterioro de estructuras de concreto por corrosión se ha incrementado notablemente, provocando serios problemas.

Cuando el acero de refuerzo se corroe en el concreto, se consume una capa de la superficie del acero y se forma una capa de productos de corrosión (óxido) en el perímetro de la varilla.

El volumen ocupado por el óxido es mayor que el del acero original creando presiones contra el concreto que rodea al acero, lo cual da lugar a la formación de grietas o las incrementa en caso de que ya existan, trayendo como consecuencia desprendimientos del concreto, lo cual además de antiestético disminuye el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural, al disminuir su capacidad de carga, ya que acero-concreto trabajan como un material compuesto.

El problema es tan grave que no solo afecta la integridad de la estructura, al incrementar los agrietamientos y reducir el espesor del área del acero de refuerzo, sino que también compromete la seguridad de las personas que lo utilizan.

En los países industrializados, las pérdidas económicas causadas por la corrosión del acero de refuerzo son elevadísimas, para evitarlo se requiere un constante mantenimiento para conservarles en buen estado.

El efecto es de tal magnitud, que países como Estados Unidos y algunos de Europa ya incluyen en sus códigos de construcción, las reglas básicas en el diseño de estructuras de concreto para que resistan ambientes agresivos.

4.2.2 Efectos de la corrosión en el puerto de Veracruz

Las condiciones climáticas en las costas y el interior del país son diametralmente opuestas entre sí, en cuanto a su severidad como agentes corrosivos. Así, las costas de Baja California no son tan agresivas como las de Sinaloa, o peor aún, que las del Golfo de México. Inclusive dentro de este último, lo que sucede en el norte de Tamaulipas es menos dañino que los ambientes de Campeche, Veracruz y Coatzacoalcos.



Imagen 4.9. Deterioro de estructuras de concreto en el interior de la zona portuaria

La rigurosidad del ataque, producto del rociado marino depende de la cercanía de la estructura al mar.

Esta situación, ha propiciado que algunas dependencias como la Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A. de C.V. (APIVER) incluyan en las especificaciones de construcción que cualquier tipo de estructura construida en el interior del recinto portuario debe emplear un acero de refuerzo con protección por inmersión en caliente, lo cual repercute en el costo de las mismas.



Imagen 4.10. Exposición del acero de refuerzo debido al salitre.

segunda es que se construya de acuerdo a sistemas constructivos tradicionales obteniéndose una reducción en el periodo de vida útil de la estructura.

Con esto se tienen dos opciones, la primera es construir las estructuras de acuerdo a sistemas constructivos tradicionales obteniéndose una reducción en el periodo de su vida útil de la estructura, o en su defecto, pagar un costo adicional derivado de la protección del acero de refuerzo en cualquiera de sus modalidades (ya sea varilla, malla electrosoldada, etc).

Por esto, las estructuras de concreto hidráulico construidas en la ciudad y puerto de Veracruz se ven afectadas anualmente por este fenómeno. En especial las que corresponden a la zona portuaria, donde los efectos son claramente visibles en pilotes de muelles y otras estructuras como son grúas de carga/descarga, bodegas en la cercanía del mar, etc., las cuales requieren un constante mantenimiento para conservarles en buen estado.

Todas aquellas estructuras expuestas al rocío marino, como es el caso de los pavimentos, también sufren los efectos corrosivos de la solución de cloruros, los cuales son arrastrados por los vientos y depositados en el acero.

Los pavimentos no son la excepción a esta regla, por lo que se requiere que cualquier pavimento que se construya dentro de la zona portuaria lleve una malla de acero protegida por inmersión en caliente

Lo que significa que al costo de la malla se debe sumar el costo del galvanizado. Suponiendo que el costo del galvanizado sea de \$4.70 por Kg y considerando que la malla pesa 2.71 Kg/m², el costo adicional al precio del insumo será de \$12.75 más el flete de la ciudad industrial al pie de la obra. A esto hay que adicionar el costo de las silletas que al igual que la malla deben ser galvanizadas.

Esto conlleva a dos situaciones, la primera es que si se requiere proteger las estructuras del efecto del salitre se debe tener un costo adicional de la misma derivado de la protección del acero de refuerzo en cualquiera de sus modalidades (ya sea varilla, malla electrosoldada, etc); y la

- Para atenuar los daños ocasionados por el salitre en estructuras agrietadas existen actualmente dos posibilidades; colocar un recubrimiento adecuado y diseñar mezclas que sean suficientemente impermeables.

El recubrimiento es la porción de material que se interpone entre el acero y el exterior, y constituye una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el ambiente.

Su eficiencia para este bloqueo depende fundamentalmente de dos factores: su espesor y su permeabilidad, las cuales se producen con bajas relaciones agua / cemento y altos contenidos de cemento en la mezcla, garantizando un concreto impermeable y de elevada resistencia mecánica.

En el caso de los muelles los problemas de corrosión se pueden reducir si se incrementa la impermeabilidad de la estructura, ya que donde hay menos grietas, lógicamente entra menos agua. Al igual que en los pavimentos, entre menos grietas haya, existe una menor exposición del acero a la brisa marina.

Por lo tanto, una vez determinadas cuales son las particularidades que conforman el deterioro de las estructuras por efecto del salitre y el agrietamiento del concreto, así como la complejidad del problema, es objetivo de la investigación buscar un remedio para su solución o al menos su mejoramiento a través de la adición de fibras PP al concreto.

4.2.3 El plástico como problema

Muchas de las ventajas de los productos plásticos se convierten en una desventaja en el momento que desechamos el envase porque es descartable o bien cuando tiramos objetos de plástico porque se nos han roto.

Si bien los plásticos podrían ser reutilizados o reciclados en su gran mayoría, lo cierto es que hoy estos desechos son un problema de difícil solución, fundamentalmente en las grandes ciudades. Es realmente una tarea costosa y compleja para los municipios encargados de la recolección y disposición final de los residuos ya que a la cantidad de envases se le debe sumar el volumen que representan.

Por sus características los plásticos generan problemas en la recolección, traslado y disposición final. Algunos datos nos alertan sobre esto, por ejemplo, un camión con una capacidad para transportar 12 toneladas de desechos comunes, transporta apenas 6 ó 7 toneladas de plástico compactado, y apenas 2 de plástico sin compactar.

- Dentro del total de plásticos descartables que hoy van a la basura se destaca en los últimos años el aumento sostenido de los envases del Polietileno Tereftalato (PET), proveniente fundamentalmente de botellas descartables de aguas de mesa, aceites y bebidas alcohólicas y no alcohólicas. Las empresas, buscando reducir costos y amparadas en la falta de legislación, han sustituido los envases de vidrio por los de plástico retornables en un comienzo, y no retornables posteriormente.

Asimismo, como se mencionó en el capítulo anterior del reciclaje de productos plásticos se obtienen diversos tipos de fibras sintéticas, entre las cuales destacan las fibras PP que son de importancia para el estudio.

4.3 Enfoque de ambos problemas

Básicamente se ha visto que el agrietamiento del concreto tiene su origen en estado plástico que inicia como pequeñas grietas las cuales en estado endurecido pueden continuar agravándose al permitir la entrada de agentes que provoquen la corrosión del acero de refuerzo, en cuyo caso los problemas de agrietamiento se incrementan.

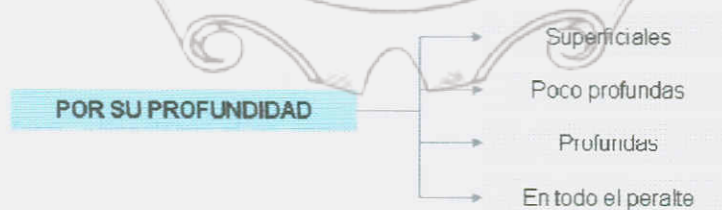
No todos los tipos de grietas son iguales, por lo que es importante conocer cuales se presentan en los pavimentos para prevenir su aparición.

4.3.1 Tipos de agrietamiento en pavimentos de concreto

En general como se describió anteriormente, el agrietamiento del concreto provoca daños independientemente de la estructura que se trate. Sin embargo, por efectos de pavimentación, las grietas pueden clasificarse en dos grupos:

- 1) Por su profundidad
- 2) Por su dirección

Figura 4.5 Clasificación de las grietas por su profundidad.



En cuanto a la clasificación por dirección, básicamente existen dos tipos de grietas, las cuales se muestran en la Figura 4.6.

Figura 4.6 Clasificación de las grietas por su dirección.



a) Grietas en forma de mapa o de piel de cocodrilo: Casi siempre de poca profundidad, debidas básicamente a la presencia de una mayor contracción en la superficie que en la parte inferior en todas direcciones. Las causas que favorecen este tipo de agrietamiento son las siguientes:

- Secado en la superficie antes del curado y de que el concreto desarrolle suficiente resistencia
- Curado con agua mucho más fría que la temperatura del concreto
- Condiciones alternas de alta y baja temperatura del concreto
- Manejo excesivo del concreto durante su colocación, lo cual puede producir segregación y sangrado
- Acabado prematuro de la superficie y espolvoreado de cemento para esta actividad
- Aplicación de agua en la superficie para facilitar el acabado

b) Grietas continuas: Este tipo de grietas a menudo son profundas y de todo el peralte, se presentan a lo ancho de la losa y son perpendiculares al eje longitudinal, una aislada o varias paralelas; asimismo, pueden iniciarse en puntos de concentración de esfuerzos. Las causas que favorecen este tipo de grietas son las siguientes:

- Corte extemporáneo
- Restricciones a la contracción
- Continuidad en el refuerzo
- Desalineación de pasajuntas
- Efectos de esquinas
- Curado deficiente
- Soporte no uniforme.
- Cargas excesivas.
- Falta de juntas de aislamiento
- Juntas de contracción muy separadas

4.3.2 Mejoras en la tecnología del concreto

De lo anterior se observa que las grietas en los pavimentos se producen en estado plástico del concreto o por problemas constructivos (los cuales quedan fuera del alcance de la investigación), además del grave problema de los altos índices corrosivos que se presentan en el puerto de Veracruz y que son un riesgo para el acero de refuerzo de cualquier tipo de estructura, incluyendo los pavimentos.

Por lo tanto, la investigación se enfoca a disminuir los problemas del concreto, buscando al mismo tiempo dar una posible solución a los graves problemas de generación de basura, mediante su aprovechamiento a través del reciclaje de plásticos por medio de su transformación en fibras PP, para su posterior adición a las mezclas de concreto con la finalidad de mejorar sus propiedades y reducir el agrietamiento en estado plástico del concreto con fines de pavimentación.

La culminación de ambas problemáticas puede ser interesante si los resultados de las pruebas de laboratorio satisfacen los requerimientos del concreto para su aplicación a pavimentos portuarios.



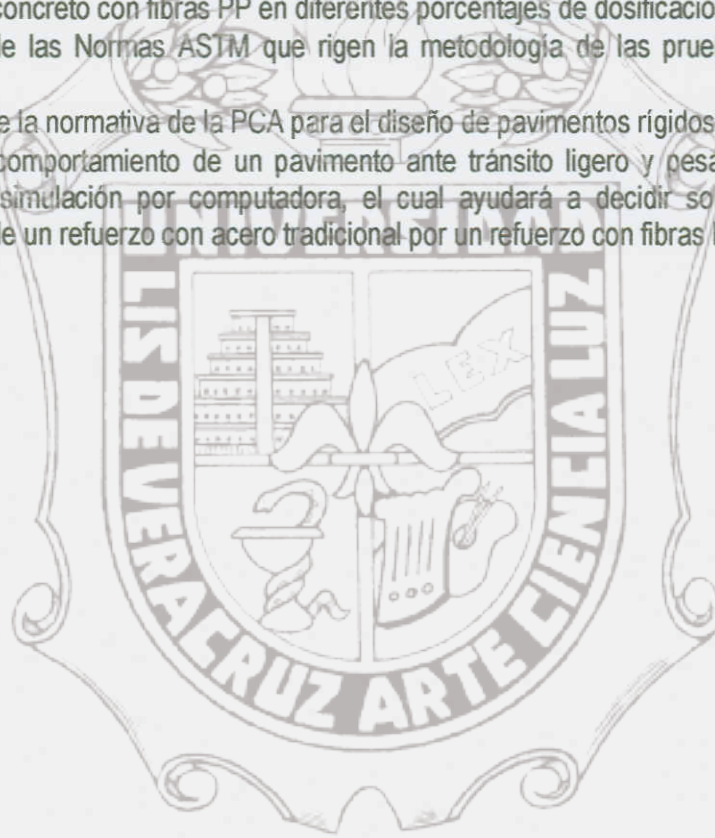
Sin embargo, el objeto de estudio de la investigación se aborda desde el ámbito estructural, considerando que este tipo de fibras sintéticas ya existen actualmente en el mercado aún cuando su aplicación a sistemas constructivos en México es limitado, por lo que solamente se han mencionado algunas aplicaciones de ingeniería en otros países con la finalidad de crear conciencia en el lector de la importancia del reciclaje en nuestro país.

La combinación de ambas problemáticas y el enfoque del estudio se esquematizan en la Figura 4.7.

4.4 Alcances de la investigación

El estudio se realiza para el Puerto de Veracruz, pero la metodología puede ser aplicable a cualquier otra zona del país. Dentro de los alcances de la tesis se pretende:

- Llevar a cabo un análisis cualitativo de los agregados que existen en la región para diseñar una mezcla de concreto de buena calidad
- Comparar los resultados del laboratorio (en cuanto a sus propiedades físicas) entre el concreto normal y el concreto con fibras PP en diferentes porcentajes de dosificación
- Utilización de las Normas ASTM que rigen la metodología de las pruebas de laboratorio al concreto
- Aplicación de la normativa de la PCA para el diseño de pavimentos rígidos en la zona portuaria
- Analizar el comportamiento de un pavimento ante tránsito ligero y pesado por medio de un modelo de simulación por computadora, el cual ayudará a decidir sobre la factibilidad de sustitución de un refuerzo con acero tradicional por un refuerzo con fibras PP





CAPITULO 5. PLANIFICACIÓN
DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Objetivos de la investigación

Los objetivos que se esperan alcanzar al término de la investigación se presentan en este capítulo, así como una breve descripción del diseño de la misma. Para que el lector tenga una idea más detallada del contenido de la investigación, estos objetivos se han agrupado en generales y particulares:

5.1.1. Objetivo General

Desarrollar un concreto con mayor resistencia a la tensión y menor tendencia a la fragmentación, en estado endurecido, que ofrezca una mejor respuesta a los esfuerzos en diversos tipos de pavimentos portuarios.

Para lograr este análisis se pretende elaborar un modelo analítico que represente el comportamiento en pavimentos portuarios del concreto hidráulico al adicionarle fibras PP, para analizar la posibilidad de sustituir total o parcialmente la malla electrosoldada que causa problemas de corrosión y para el control de las grietas causadas por el asentamiento plástico y los cambios de temperatura.

5.1.2. Objetivos Particulares

Los objetivos específicos están encaminados a identificar los posibles factores de influencia en la resistencia del concreto hidráulico para pavimentos. La descripción de estos objetivos queda de la siguiente forma:

- a) Conocer las fibras sintéticas que se pueden obtener a partir del reciclaje de los desechos plásticos, y la aplicación de fibras PP en el concreto hidráulico.
- b) Verificar las características de los agregados pétreos del puerto de Veracruz para realizar el diseño de la mezcla en base a las propiedades de los agregados.
- c) Mejorar la tecnología desarrollada para el diseño de concreto en cuanto a la formación de grietas.
- d) Diseñar mezclas de concreto reforzado con diferentes % de fibras de polipropileno para evaluar mediante análisis experimental:
 - Las propiedades mecánicas
 - La trabajabilidad
 - Resistencia a la compresión
 - Resistencia a la flexión
 - Resistencia a la tensión

- e) Describir el comportamiento de las fibras PP en las mezclas de concreto hidráulico, a partir de las pruebas de laboratorio realizadas.
- f) Buscar el porcentaje óptimo de fibras PP por adicionar en una mezcla de concreto mediante pruebas del laboratorio, para determinar en que cantidad deben ser utilizadas para obtener mejores resultados.
- g) Definir un modelo matemático de comportamiento para el diseño de pavimentos portuarios con fibras PP en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de materiales y el método del PCA.
- h) Analizar el comportamiento estructural de un pavimento portuario con un grado elevado de representatividad de acuerdo al modelo elaborado para diferentes tipos de tránsito (ligero y pesado).
- i) Evaluar la posibilidad de sustituir la malla electrosoldada total o parcialmente por fibras PP a través de un análisis por computadora.
- j) Determinar las ventajas técnicas del concreto reforzado con fibras PP para aplicarlo al diseño de pavimentos rígidos.
- k) Indicar si el empleo de fibras sintéticas es económico.

Estas metas planteadas proporcionan el contexto metodológico y el marco de referencia para el desarrollo del estudio, guiando además el proceso de búsqueda de la investigación.

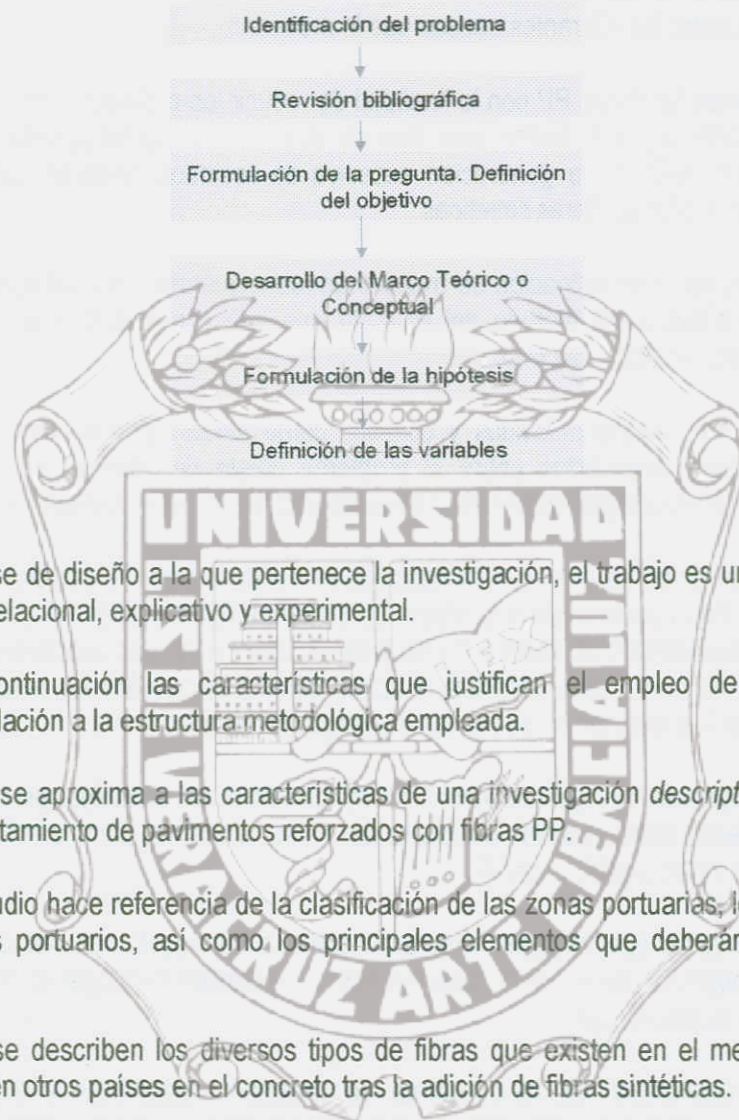
5.2 Tipo de investigación

5.2.1. En base al Objetivo General

El diseño y la configuración de un estudio se conciben primeramente como la idea o pensamiento original que impulsa a la investigación. Este primer ensayo se alimenta conforme llegan más ideas hasta desarrollar las fases de diseño de la investigación, finalmente llegando a su culminación hasta definir y concretar los objetivos específicos del estudio, convirtiéndolo en un problema investigable, tal como se muestra en la Figura 5.1.

Con esta finalidad se determinaron los objetivos de estudio. De acuerdo a estos criterios una investigación puede clasificarse como exploratoria, descriptiva, comparativa o correlacional, explicativa y experimental.

Figura 5.1. Proceso de conceptualización del problema.



En cuanto a la clase de diseño a la que pertenece la investigación, el trabajo es un estudio descriptivo, comparativo o correlacional, explicativo y experimental.

Se exponen a continuación las características que justifican el empleo de estos modelos de investigación en relación a la estructura metodológica empleada.

En forma general, se aproxima a las características de una investigación *descriptiva*, ya que pretende describir el comportamiento de pavimentos reforzados con fibras PP.

Inicialmente el estudio hace referencia de la clasificación de las zonas portuarias, los niveles de tránsito en los pavimentos portuarios, así como los principales elementos que deberán considerarse en el diseño.

Al mismo tiempo se describen los diversos tipos de fibras que existen en el mercado, así como las mejoras logradas en otros países en el concreto tras la adición de fibras sintéticas.

Asimismo, se expone el análisis de los elementos que componen un firme portuario, las características de las superficies de apoyo y algunos criterios básicos del diseño de pavimentos; siendo todo esto la sustentación teórica que sirve para ubicar al lector ofreciendo una situación panorámica del tema a desarrollar.

Esta primera parte de la investigación reúne las características de una investigación *descriptiva*:

“La investigación descriptiva se emplea única y exclusivamente para describir la distribución existente entre las variables sin ocuparse de sus causas. Son estudios sencillos que responden a preguntas referidas a características del sujeto, lugar y tiempo en que ocurre el fenómeno estudiado”.²⁰

En la segunda parte de la investigación se expone la problemática del agrietamiento del concreto, sus causas y repercusiones en las estructuras, en especial los pavimentos, al mismo tiempo se menciona la relación que existe entre las diferentes causas que lo provocan.

Esto justifica el uso de las fibras PP con la finalidad de reducir los problemas de corrosión, debido a los altos índices de deterioro que sufren este tipo de estructuras, contribuyendo a eliminar un grave problema ambiental como es la generación excesiva de residuos plásticos, los cuales pueden ser reciclados y transformados en fibras sintéticas.

En la primera parte de la investigación se mencionan los requerimientos del concreto en pavimentos, así como una descripción del método del PCA, lo que indica cuales son los posibles factores de influencia en la resistencia del concreto.

Estos criterios se han conceptualizados y utilizado como variables, convirtiéndose en herramientas manejables para tener respuestas sobre el problema objeto de estudio. Por lo que la estructura metodológica utilizada se adapta fácilmente a la secuencia de una investigación descriptiva.

Es decir, los objetivos, no se limitan a la descripción del problema de estudio para proporcionar un panorama general de la problemática, también, se pretende establecer la relación que existe entre el incremento en los porcentajes de fibras PP y las propiedades mecánicas del concreto, es decir, la forma en que se relacionan dos o más variables a través de la comparación de resultados. De donde se aprecian claramente las características de una investigación *correlacional*:

“La investigación *correlacional* permite encontrar relaciones entre variables, es decir, comprender las causas que encadenan ciertos efectos o respuestas. Estas relaciones entre variables deben someterse a pruebas estadísticas de significación”.²⁰

Para buscar respuestas que ofrezcan una explicación a los resultados del estudio *descriptivo*, y *correlacional*, los objetivos de la última fase del trabajo, permiten catalogar la investigación como un estudio explicativo, debido a que:

“La investigación explicativa: Es la que trata de descubrir, establecer y explicar las relaciones causalmente funcionales que existen entre las variables estudiadas, y sirve para explicar cómo, cuándo, dónde y por qué ocurre un fenómeno”.²¹

Esto aplica para la última fase del trabajo de investigación, en donde se pretende encontrar la relación que existe entre la adición de las fibras PP, el incremento de las propiedades mecánicas y el comportamiento de los modelos de simulación de pavimentos portuarios, por lo que se puede definir como una investigación *explicativa*.

Y finalmente, del comportamiento de las variables y la relación que existe entre ellas, se puede decir que la investigación al mismo tiempo es de tipo experimental.

“La investigación experimental estudia la manipulación o control de una o más variables. La variable manipulada se llama independiente, y se halla bajo control directo del investigador. Su variación dentro

del grupo estudiado origina cambios en la variable dependiente y esta relación es la que se pretende demostrar".²⁰

5.2.2. Según el carácter de la medida

De acuerdo a esta clasificación existen dos tipos de investigaciones: la cualitativa y la cuantitativa.

A pesar que una investigación cualitativa se define como:

"Aquella que pretende la interpretación de los fenómenos y admite diversas interpretaciones. Muchas veces hay una interrelación entre el investigador y los objetos de investigación, pero las observaciones y mediciones que se realizan se consideran válidas mientras constituyan representaciones auténticas de alguna realidad. Los resultados no pueden constituir conclusiones generalizables, pero si pueden ser comparables y aportar información relevante para otras situaciones y entornos"²¹

El primer trabajo de laboratorio, comprende el estudio cualitativo realizado sobre los agregados pétreos para conocer sus características y en base a ello, realizar el diseño de las mezclas de concreto.

El segundo trabajo de laboratorio en la investigación corresponde a un estudio cuantitativo, de acuerdo a la definición:

"La investigación cuantitativa se basa en el énfasis y la precisión de los procedimientos para la medición. Otra característica predominante de los métodos cuantitativos es la selección subjetiva e intersubjetiva de indicadores (a través de conceptos y variables) de ciertos elementos de procesos, hechos, estructuras y personas"²².

El estudio cuantitativo, a su vez se divide en dos etapas, la primera corresponde a los ensayos en el laboratorio de materiales de los especímenes de concreto; la segunda etapa realizada en gabinete, corresponde a la elaboración por computadora de los modelos de simulación de losas a escala para evaluar el comportamiento de los pavimentos.

En relación a la controversia que existe acerca de la elección del método cuantitativo o cualitativo, la metodología cualitativa puede ser tan eficiente como la cuantitativa, la diferencia va en función de la capacidad de análisis de cada una dependiendo del tema que se va a evaluar, lo cual las hace oportunas en circunstancias y situaciones distintas.

5.2.3 Según el marco en que tienen lugar

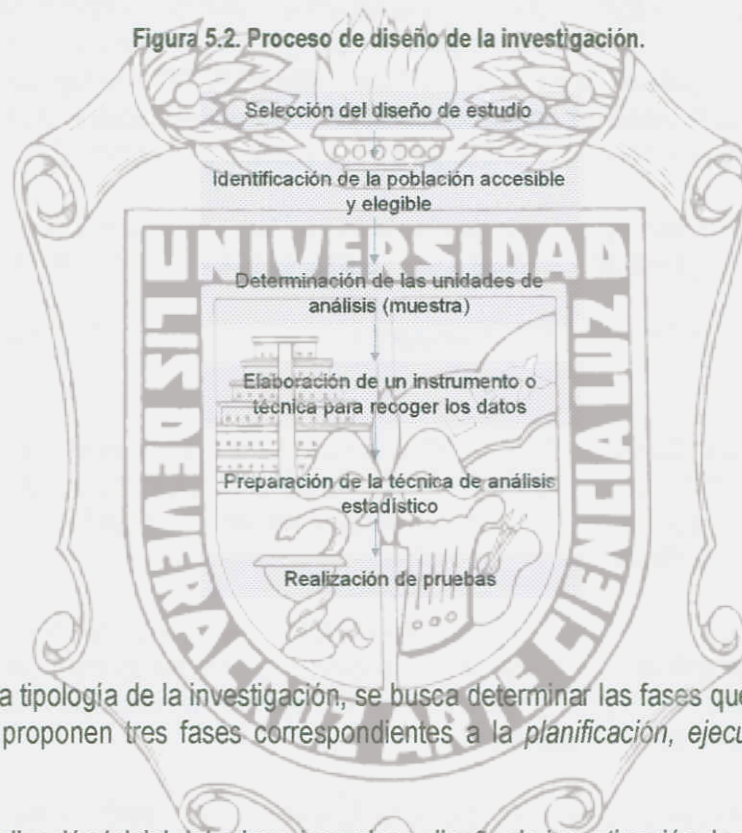
De acuerdo a esta clasificación existen dos tipos de investigaciones: de laboratorio y de campo o sobre el terreno.

A efectos de los resultados que se pretenden encontrar esta investigación se realizará al 100% en laboratorio, donde a través de pruebas se intentará reproducir los fenómenos estudiados lo más cercano a su realidad, considerando para ello diversos factores o variables.

5.3 Diseño de la investigación

Una vez clasificada el tipo de investigación que se va a realizar, se procede a establecer el diseño de la misma y las variables de estudio, la metodología de la investigación, la muestra de estudio, el método de análisis de los resultados y la determinación de las fases del trabajo planificándolo en espacio y tiempo, todo ello enmarcando en un modelo específico de investigación.

Figura 5.2. Proceso de diseño de la investigación.



Una vez definida la tipología de la investigación, se busca determinar las fases que componen el diseño de la misma. Se proponen tres fases correspondientes a la *planificación*, *ejecución* y *redacción del trabajo*.

Partiendo de la realización inicial del primer borrador o diseño de investigación, la definición de las fases y tareas refleja el conjunto de decisiones, que finalmente fueron plasmadas en la redacción final del proyecto y que han servido de guía en el desarrollo de la investigación, marcando las pautas a seguir en la redacción de datos y en el proceso general de la investigación.

A. FASE INICIAL: Etapa de planteamiento, proyección de la investigación y elaboración del protocolo de tesis.

1. Conceptualización y formulación del problema
2. Revisión bibliográfica sobre el tema objeto de estudio
3. Elaboración del marco axioteológico (Hipótesis, variables y objetivos)
4. Determinación de las muestras de la investigación
5. Selección del método y material de estudio

6. Cronograma del proyecto
7. Presentación del anteproyecto, aprobación ante la academia y elaboración del proyecto de investigación

B. FASE DE ESTUDIO: Etapa de desarrollo del trabajo de la investigación.

1. Planificación y organización del acceso al laboratorio (temporización, contactos y visitas de presentación)
2. Obtención de recursos humanos y materiales (formación del equipo colaborador)
3. Instrumentos de recolección de datos
4. Ejecución de las pruebas de laboratorio (control y seguimiento de la obtención de datos)
5. Análisis estadístico de los datos

C. FASE FINAL: Etapa de análisis y redacción de la investigación.

1. Análisis de resultados (elaboración de los informes del resultado)
2. Redacción y presentación del informe final

A partir de este panorama se expone a continuación, cada una de las tareas efectuadas en las distintas fases.

A. FASE INICIAL

A.1 Conceptualización y formulación del problema

La investigación pretende determinar las ventajas a nivel tanto técnico como económico del uso de las fibras PP en el concreto con aplicación a pavimentos portuarios, para encontrar el porcentaje adecuado de fibra PP que se debe agregar a la mezcla, al mismo tiempo se pretende evaluar la factibilidad de sustituir la malla electrosoldada que causa los problemas de corrosión por este tipo de fibras.

Todas las personas relacionadas con el mundo del concreto, conocen la naturaleza del material al agrietamiento debido a que se fabrica en estado plástico. Estas grietas exponen a las estructuras cercanas al mar (como en el caso de los pavimentos portuarios) a los efectos del salitre.

Una vez que el salitre entra en una estructura de concreto reforzado, el acero de refuerzo presenta grandes problemas de corrosión, lo cual trae serias consecuencias al sistema estructural, provocando el deterioro de la estructura.

Por otro lado, en las últimas décadas, la degradación del ambiente se ha convertido en un desafío para todos los países, en particular para los más pobres. Cada vez más, los problemas relacionados con el ambiente y los recursos naturales tienen repercusiones económicas y ecológicas. Esta situación justifica la búsqueda del aprovechamiento de los residuos y su aplicación a proyectos de ingeniería.

Así, la investigación considera la perspectiva ecologista del aprovechamiento a través del reciclaje de los residuos plásticos, como un hecho que se debe afrontar y tomar con seriedad.

Finalmente todos los productos se han de desechar algún día, ya que están compuestos de materia y no son eternos, los plásticos son un claro ejemplo de esto.

Ante la necesidad de contribuir a la protección del medio ambiente, la investigación propone el empleo de fibras sintéticas como aditivos a las mezclas de concreto, las cuales son productos ecológicos que aprovechan la gran cantidad de residuos que se producen a diario, ya que, el volumen de residuos se incrementa en forma alarmante día con día.

Mediante el reciclaje, esta cantidad de desechos se puede transformar en fibras sintéticas que se pueden agregar como aditivo al concreto en las proporciones requeridas. Este es el punto de partida de la investigación, la cual pretende diagnosticar los factores que inciden en la resistencia del concreto, fundamentándose en la aplicación que otros países han realizado de este tipo de fibras a diversas estructuras de ingeniería.

A través de muestras representativas de concreto mediante pruebas de laboratorio y con la aplicación de las normas ASTM se pretende diagnosticar el comportamiento de las diferentes mezclas de concreto.

Con la finalidad de ampliar y profundizar los datos obtenidos se pretende plantear potenciales alternativas de mejorar este material.

A.2 Revisión bibliográfica sobre el tema objeto de estudio

El proceso de análisis parte de la revisión bibliográfica, método de búsqueda y diagnóstico que permite averiguar algunos antecedentes sobre el tema. Estos datos han sido considerados como indicativos de influencia en el problema objeto de estudio y utilizados para determinar las variables de estudio.

La revisión bibliográfica supone una de las tareas iniciales de este documento. Posteriormente, este quehacer se ha compaginado con las distintas labores realizadas a lo largo de las diferentes etapas del proceso de la investigación.

Al concentrarse en la fase de reflexión, planteamiento y proyección del problema objeto de estudio, y siguiendo el modelo del proceso de investigación, se muestra la diferencia entre dos tipos de información bibliográfica:

- Bibliografía Conceptual, la cual corresponde a la documentación (libros, artículos, revistas, información obtenida de Internet, etc) de autores que exponen su conocimiento sobre el campo específico del tema de estudio. A través de ellos se obtiene la información base, fundamental para familiarizarse con el contenido y comenzar a delimitar la investigación.

- Bibliografía de investigación, que ofrece conocimiento de los trabajos e investigaciones que abordan sobre el tema de estudio. Los cuales sirven para aportar la información de referencia para iniciar el diseño y la planeación de este trabajo.

La Tabla 5.1 presenta un esquema con las diferentes fuentes bibliográficas que se utilizaron en esta fase.

Fuentes Bibliográficas	Documentos	Información
Monografías	Libros, revistas especializadas, artículos de Internet, etc.	Conceptual, antecedentes históricos, fundamentación metodológica, etc
Congresos	Conferencias, ponencias, etc	Trabajos de Investigación
Bibliotecas	Libros, revistas especializadas, artículos de Internet, etc.	Conceptual, antecedentes históricos, fundamentación metodológica, etc

Tabla 5.1. Fuentes bibliográficas utilizadas.

Se resalta la colaboración de la biblioteca del Instituto de ingeniería y de la USBI (Unidad de Servicios Bibliotecarios), por su contribución en el proceso de localización y obtención de fuentes documentales gracias al sistema de coordinación de préstamos.

Respecto a la asistencia a Congresos, se seleccionaron aquellos organizados por la AMIP (Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria), la SMIE (Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural), el Centro Regional de Desarrollo de Ingeniería Civil (CRDIC), el Colegio de Ingenieros Civiles A.C, y otros de ámbito Estructural.

A continuación se presenta un breve desglose de la obtención de los datos que corresponden a la primera parte de la Investigación, y que se basa en la fundamentación teórica de la misma.

Así pues, la información sobre los diferentes usos de las superficies terrestres, los tipos de cargas que influyen sobre las estructuras portuarias y los elementos que componen un firme, se obtuvo a partir de la revisión de una amplia bibliografía, datos obtenidos de Internet y revistas especializadasⁱⁱ.

Para dar respuesta al primer objetivo del estudio, se comienza por recopilar y ordenar información respecto a las experiencias de diversos países en el reciclaje de los desechos plásticos, de donde se ha implementado la obtención de las fibras sintéticas, entre ellas las fibras de PP, que son de interés en el estudio.

A partir del análisis de esta información, se procede a identificar y ordenar de forma esquemática la consideración de los desechos plásticos como problema, su clasificación, características, usos y aplicaciones; reciclaje y rehuso, y los diferentes tipos de fibras sintéticas obtenidas a partir de los

ⁱⁱ Datos basados por sus estimaciones por autores, o bien obtenidos de artículos de revistas o internet.

desechos de PET (botellas, bolsas de plástico, etc). Para ello se utilizó el mismo tipo de información arriba mencionadoⁱⁱ.

Para dar seguimiento de las pruebas de concreto en el laboratorio se realizó previamente una investigación sobre las especificaciones de la ASTM que rigen el comportamiento de este tipo de pruebas, para esto, se recurrió a bibliografía con información secundaria no recienteⁱⁱⁱ, que fue completada y actualizada en algunos casos a través de recomendaciones de expertos^{iv}.

El diagnóstico del efecto del salitre sobre las estructuras en general, se basa en información reciente de artículos de revistas expertas en el temaⁱ.

A.3 Elaboración del marco axioteológico

A partir de la bibliografía conceptual recopilada, y la familiarización con el tema de la corrosión de estructuras, se delimita la investigación al puerto de Veracruz; se plantea la hipótesis del estudio; y en base a ello se determinan las variables que intervienen en cada parte del estudio.

A.4 Determinación de las muestras de la investigación

Entrando en la fase de planificación del desarrollo del trabajo de laboratorio, se determina cuales van a ser las muestras de los materiales que servirán para la obtención de datos.

En el primer trabajo de laboratorio, la población corresponde al agregado fino y grueso (tal y como se extraen del banco de materiales de la región), de los cuales se quiere conocer sus características con fines de diseño de una mezcla de concreto.

- La población del estudio cualitativo en el primer trabajo de laboratorio es:
 - El agregado fino (la porción que se analiza en laboratorio del total del universo para conocer sus características, de acuerdo a cada tipo de prueba por realizar y apeándose a las especificaciones de la ASTM)
 - El agregado grueso (la porción que se analiza en laboratorio del total del universo para conocer sus características, de acuerdo a cada tipo de prueba por realizar y apeándose a las especificaciones de la ASTM)

En el segundo trabajo de laboratorio referente al estudio cuantitativo, las muestras corresponden a los especímenes fabricados en el laboratorio (cilindros y vigas) los cuales sirven para representar el comportamiento del concreto con fibras PP.

iii Procedimientos de acuerdo a pruebas de campo realizadas por Departamentos de Ingeniería Experimental de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, da hace más de 7 años.

iv Información cuantificada por expertos en el campo o por informantes fiables.

- La muestra representativa del estudio cuantitativo de concreto corresponde a:
 - Cilindros para pruebas de tensión indirecta
 - Cilindros para pruebas de compresión
 - Vigas para ensayos a flexión

A.5 Selección del método y material de estudio

Como se mencionó anteriormente, la metodología de investigación se ajusta a las características del Método Descriptivo, Comparativo o Correlacional, Explicativo y Experimental.

Metodología de la investigación	Estrategia Metodológica	Técnicas de recolección de datos
Descriptivo, comparativo y experimental	Triangulación	Ensayos de probetas especímenes hechos en laboratorio y la observación

Tabla 5.2. Resumen del método y material utilizado en la investigación.

La adaptación de las técnicas de recolección de datos, corresponde en este caso en particular a la aplicación de los siguientes instrumentos, para cumplir la estrategia metodológica de triangulación entre los métodos cuantitativos y cualitativos:

- Ensayos de laboratorio
- Observación del comportamiento de los especímenes
- Elaboración de los modelos de simulación

Para la determinación de los datos cualitativos se emplean algunas fórmulas básicas para determinar del módulo de finura de los agregados, así como los porcentajes de humedad, granulometría y demás características.

El análisis de los datos cuantitativos se realiza mediante pruebas estadísticas para determinar los valores promedios de la resistencia del concreto.

En los modelos de simulación de losas a través del programa RAM Advanse, los resultados se comparan a partir de los datos obtenidos del diseño de un pavimento por el método del PCA para las diferentes configuraciones propuestas.

La estrategia del método y las técnicas de recolección de información se ajustan a la mostrada en la Tabla 5.3.

Procesos de la estrategia	Método Cualitativo	Método Cuantitativo
Instrumentos	Observación (interpretación y descripción del evento) y equipo de laboratorio	Equipo de laboratorio y software
Tratamiento de los datos	Análisis de contenido	Estadística descriptiva (Resistencias promedios)
Niveles de análisis		Intracolectivo
		Intercolectivo
Triangulación metodológica	Método explicativo:	Método descriptivo:
	Datos explicativos de las razones y motivos de los resultados. Información de contraste y complemento para el diseño de las muestras del estudio cuantitativo	Información panorámica de la situación real del objeto de estudio
		Método comparativo:
		Información sobre la relación que existen entre las variables de estudio
		Método experimental:
		Manipulación de la variable independiente para contrastar los efectos sobre la variable dependiente

Tabla 5.3. Resumen de la estrategia metodológica.

A.6 Cronograma del anteproyecto

Las etapas principales de la investigación se distribuyeron en el siguiente orden cronológico:

- Etapa de conceptualización-planteamiento de la investigación: de Agosto de 2003 a Octubre de 2003.
 - Conceptualización, planteamiento, proyección del tema objeto de estudio, revisión bibliográfica y formulación del problema: Agosto de 2003 a Septiembre de 2003.
 - Elaboración del marco axioteológico (hipótesis, variables y objetivos): Agosto de 2003 a Septiembre de 2003.
 - Determinación de las fuentes de apoyo para la investigación: Agosto de 2003 a Octubre de 2003.

- Etapa de desarrollo del protocolo de investigación: de Agosto de 2003 a Febrero de 2004.
 - Investigación bibliográfica de libros, revistas, Internet y asistencia a congresos para la elaboración de la 1ra parte de la investigación: Agosto de 2003 a Octubre de 2003.
 - Lectura de las fuentes de información: Septiembre de 2003 a Noviembre de 2003.
 - Definición de la estructura: Octubre de 2003 a Noviembre de 2003.
 - Redacción del anteproyecto de investigación: Noviembre de 2003 a Enero de 2004.

- Presentación ante el asesor de tesis y correcciones: Enero de 2004
- Presentación y aprobación ante la academia: Febrero de 2004.
- Etapa de desarrollo del trabajo de investigación investigación: de Marzo de 2004 a Enero de 2006.
 - Investigación bibliográfica de libros, revistas, Internet y asistencia a congresos para la elaboración de la 1ra parte de la investigación: Marzo de 2004 a Julio de 2005.
 - Planificación y organización de accesos al laboratorio: Julio de 2005 a Noviembre de 2005.
 - Proceso completo del estudio cualitativo (granulometría de los agregados grueso y fino): Noviembre de 2005.
 - Proceso completo del estudio cuantitativo correspondiente a las pruebas destructivas de concreto: Diciembre de 2005 a Enero de 2006.
- Etapa de análisis y redacción de la investigación: de Marzo de 2005 a Enero de 2006.
 - Análisis de resultados (cualitativo-cuantitativo): Diciembre de 2005.
 - Diseño del pavimento por el método del PCA y elaboración de los modelos de simulación: Diciembre de 2005.
 - Redacción de la investigación: Marzo de 2005 a Enero de 2006.

A.7 Presentación del anteproyecto, aprobación ante la academia y elaboración del proyecto de investigación

La definición del proyecto constituye la apertura de un nuevo espacio de reflexión que se sitúa en el conjunto de la planificación. La elaboración de este documento, exigió en su elaboración un esfuerzo teórico que sirvió como inicio de todo el proceso de investigación; en el cual se plasmaron por escrito las decisiones tomadas en las fases anteriores, definiendo el tema objeto de estudio acotado tras la revisión de los conocimientos y expresando las consideraciones en relación al tipo de investigación, criterios de actuación, objetivos e hipótesis, material, método y estrategias, etc.

Asimismo, el entender la necesidad de disponer de un proyecto se justifica, al menos, por las siguientes razones:

- En primer lugar, cumplir con un requisito de toda maestría, para obtener la suficiente habilidad de realizar una investigación. Para ello se presentó el protocolo de tesis ante la Academia de Estructuras con el fin de obtener su aprobación.
- En segundo lugar, estructurar el esquema inicial de la investigación para elaborar un primer documento de planificación del proceso, en ayuda con el director de la tesis.
- En tercer lugar, disponer de un documento escrito que pueda ser revisado y sometido a juicio de expertos para garantizar, que el proyecto reúne las connotaciones necesarias para desarrollar un trabajo de tesis de grado.

B. FASE DE ESTUDIO

B.1 Planificación y organización del acceso al laboratorio

Todo proceso de investigación necesita de una meticulosa planificación de lo que se pretende realizar para obtener resultados satisfactorios. Atendiendo de forma concreta las características de esta investigación, se pueden señalar algunos factores que justifican la programación del trabajo:

- La aplicación de dos procesos de investigación diferentes pero dependientes (estudio cualitativo y cuantitativo)
- El volumen de la muestra: La población formada por los elementos de análisis.

Estas condicionantes obligaron a planificar la realización de algunas tareas imprescindibles antes de entrar directamente al laboratorio.

- Manejo de las normas ASTM que rigen las pruebas de los agregados pétreos
- Conocer los criterios de diseño de pavimentación portuaria
- Conocer las características de las fibras PP dadas por el fabricante
- Obtener la solicitud de los permisos por parte de la dirección del Instituto de Ingeniería
- Obtener la aprobación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana para acceder al laboratorio de materiales a realizar las pruebas

La primera parte de la investigación correspondiente al estudio cualitativo se distribuyó de la siguiente manera:

- Formación del equipo colaborador
- Acceso al laboratorio
- Seguimiento y control de acceso en el mismo
- Final del acceso al laboratorio: recolección y clasificación de datos
- Tabulación de datos

Una vez recolectados los datos cualitativos de las muestras de los agregados y analizados los resultados, se obtendrá la información para realizar el diseño del concreto, y encontrar el porcentaje óptimo de fibra PP que mejore sus propiedades mecánicas sin una reducción de la trabajabilidad de la

mezcla. De este modo se procederá a la segunda parte de la investigación correspondiente al estudio cuantitativo en su primera fase (2do trabajo de laboratorio):

- Diseño de la mezcla patrón
- Dosificación de fibras PP en porcentajes
- Contacto con las muestras seleccionadas
- Ensayos destructivos de los especímenes de concreto en el laboratorio
- Transcripción de los resultados

Finalmente, una vez determinada la cantidad óptima de fibras PP, el siguiente paso es la elaboración de un modelo de simulación de losas macizas mediante el software Ram Advanse reforzadas con malla electrosoldada y otra con las propiedades de las fibras PP obtenidas en el laboratorio a partir de las pruebas de concreto obtenidas de forma experimental. De este modo se pasará a la segunda fase del estudio cuantitativo (trabajo de gabinete):

- Diseño estructural de un pavimento portuario por el método del PCA
- Elaboración del modelo de simulación
- Análisis estructural de un pavimento con malla electrosoldada por medio del programa RAM Advanse
- Análisis estructural de un pavimento con fibras PP por medio del programa RAM Advanse
- Comparación del comportamiento de ambos modelos de simulación para tráfico ligero y pesado
- Transcripción de resultados obtenidos a través del modelo matemático realizado

B.2 Obtención de recursos humanos y materiales

Por la naturaleza de realización de los trabajos de laboratorio se sabe la necesidad de contar con un equipo colaborador, por lo que se platicó de antemano con 2 alumnos de 5 semestre de Ingeniería Civil quienes por llevar la materia denominada "Laboratorio de materiales" tienen acceso al laboratorio y conocimiento de cómo hacer las pruebas; los cuales accedieron a colaborar en las fechas que fuera necesaria su presencia.

Adicional a estos 2 alumnos, en el laboratorio se encuentra una alumna de 9 semestre realizando su servicio social, quien también fue incluida en la formación del equipo colaborador.

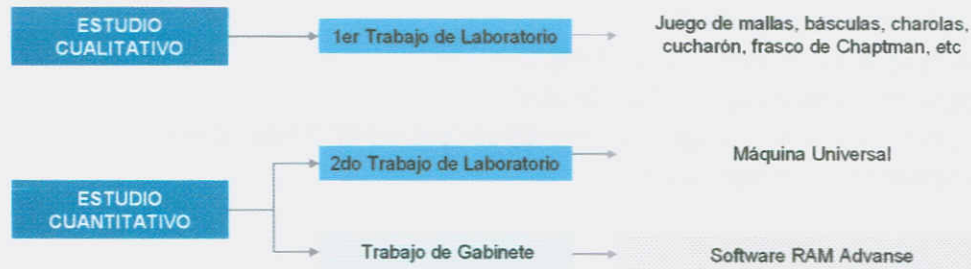
Los recursos materiales fueron financiados por cuenta propia.

B.3 Instrumentos de recolección de datos

La investigación en su totalidad está conformada por una combinación de la metodología cualitativa y cuantitativa.

Estos instrumentos corresponden al seguimiento de ambos métodos, sin embargo, en cada parte de la investigación, el complemento de estos elementos son:

Figura 5.3. Instrumentos para recolección de datos.



B.4 Ejecución de las pruebas de laboratorio

1. Características de los agregados

El diseño de las pruebas de laboratorio para los agregados se realizará de acuerdo a normas preestablecidas por la ASTM la grava y la arena deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C 33.

Para el caso específico de la arena, las normas que rigen al agregado fino para pruebas de laboratorio son:²⁴

- Peso volumétrico seco suelto y compactado de arena y grava (determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29)
- Humedad superficial del agregado fino de acuerdo a la ASTM C 566
- Densidad y absorción de arena (determinadas de acuerdo con la norma ASTM C128)
- Granulometría de arena y grava (realizada de acuerdo con la norma ASTM C136)
- Módulo de finura del agregado fino (realizado de acuerdo a la norma ASTM C 125)

Otros requisitos de la norma ASTM son:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1

Para el caso específico de la grava, las normas que rigen al agregado grueso para pruebas de laboratorio son:²⁴

- Peso volumétrico seco suelto y compactado de grava (determinado de acuerdo con la norma ASTM C 29)
- Densidad y absorción de grava (determinadas de acuerdo con la norma ASTM C 127)
- Granulometría de grava (realizada de acuerdo con la norma ASTM C 136)

Además de estas normas se hará uso de la norma ASTM C 1077, relativa al ensayo de concreto y agregados en el laboratorio.

2. Diseño de la mezcla de concreto

Cualquier mezcla de concreto que se diseñe, debe cumplir con los requisitos básicos de ser económico, fácil de colocar, resistente y durable.

Estas características pueden ser logradas con una selección adecuada de los componentes del concreto, tanto en su calidad como en las proporciones en que éstos se combinan, esta selección se llama **diseño de la mezcla**.

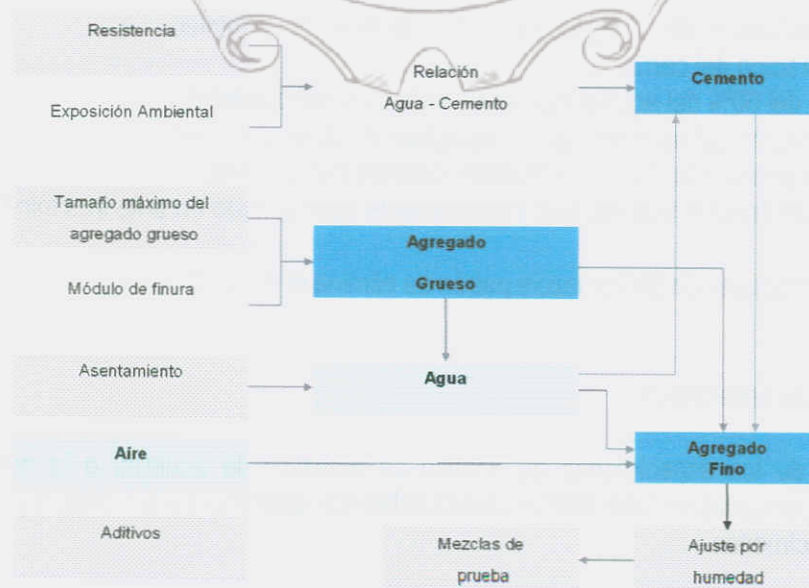
Proporcionar una mezcla, es determinar las cantidades de cemento, arena, grava y agua, de tal manera que produzcan un concreto que a los 28 días de edad de una resistencia a la compresión, igual, dentro de ciertos límites a la que el ingeniero constructor necesita.

La calidad del concreto depende de la calidad de los agregados, la pasta y la adherencia entre ambos. La cantidad de agua usada afecta en gran medida la calidad de la pasta: normalmente, a mejor calidad de agua, mejor calidad del concreto.

Por lo general se especifica una relación agua/ cemento máxima, para evitar el exceso de agua y para asegurar una buena calidad de pasta. Sin embargo, un elemento importante en la contracción del concreto es el contenido de agua, cuanto mayor sea el contenido de agua de un concreto, tenderá a contraerse más. Por lo tanto se deberán realizar los proporcionamientos de mezclas con la menor cantidad de agua posible por metro cúbico de concreto, considerando que uno de los problemas que se busca resolver es el del agrietamiento en los pavimentos por contracción.

Por lo tanto, en la investigación, se deberá determinar el tamaño máximo del agregado y a partir de esto establecerá un plan de ensayos a realizar en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

Figura 5.4. Pasos en el diseño de una mezcla en el Método de Pesos y Volúmenes.



Las proporciones del diseño de la mezcla del concreto se diseñarán por peso, siguiendo el esquema de la Figura 5.4, a la cual se le añadirán el volumen de fibras de polipropileno, y se conservará la muestra patrón (sin fibra), la cual servirá de parámetro de comparación.

En este caso en particular, el proporcionamiento se realizará a partir de las propiedades de los agregados, para una mezcla de concreto de $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, el cual es la resistencia promedio considerada en el diseño de pavimentos.

3. Dosificaciones de las fibras de polipropileno

Se elaborará una mezcla patrón sin fibras y a partir de ésta se agregarán diversas dosificaciones de fibras de polipropileno, considerando como base la adición de 660 grs por m^3 siendo ligeramente mayor que la dosificación dada por el fabricante y a partir de ésta se elaborarán tres mezclas con mayores dosificaciones.

Los porcentajes a adicionar estarán dados en función del peso del cemento, en intervalos de 0.25%. En total se realizarán 4 muestras, la muestra patrón (sin fibras PP) y tres muestras adicionales con diferentes porcentajes de fibras PP.

4. Secuencia de mezclado

El concreto deberá ser mezclado de modo que el cemento, agua, agregados y aditivos se combinen en una mezcla uniforme. Por lo que el mezclado y preparación del concreto correspondiente a cada mezcla se realizará en una sola batida para evitar incorporar variables o condicionantes adicionales relacionadas con la manipulación y dosificación de los materiales, preparación y vaciado de la mezcla.

Con fines de obtener una muestra de concreto con fibras PP perfectamente integrada, el mezclado se realizará bajo el siguiente proceso:

- 1) Homogenización de los agregados y mezcla durante un minuto.
- 2) Incorporación del cemento.
- 3) Adición del 60% del agua y mezcla de todos los componentes.
- 4) Incorporación del resto del agua y mezclado durante un minuto.
- 5) Incorporación de las fibras y mezclado durante tres minutos.
- 6) Descanso durante tres minutos y nuevamente es mezclado durante tres minutos adicionales.

En el caso de la fabricación de la mezcla patrón se elimina el paso 5).

5. Fabricación de especímenes

La fabricación de los especímenes de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM C 192 (especímenes fabricados en laboratorio), la cual cubre los requisitos para moldes y para la elaboración y curado de especímenes.

Los moldes empleados para la fabricación de los especímenes pueden ser de hierro fundido y cumplen con las tolerancias especificadas de absorción, elongación y dimensionales (ASTM C 470).

Para cada una de las 4 mezclas fabricadas se realizarán vigas prismáticas 15x15x60 cm para los ensayos de rotura a flexión, con los que se obtendrán las propiedades correspondientes. Se fabricarán también, probetas cilíndricas 15x30 cm para medir la resistencia a la compresión y tensión indirecta.

Las probetas se mantendrán en sus moldes por 24 horas y posteriormente se desmoldarán y se introducirán a la cámara de curado durante 7, 14 y 28 días.

6. Pruebas al concreto en estado fresco

Los ensayos a realizar son los de trabajabilidad y asentamiento, para determinar la facilidad de colocación del concreto con fibras, y para poder comparar como afecta la adición de fibras a las mezclas en cuanto a su facilidad de colocación. Por lo tanto, los ensayos se realizarán con el concreto en estado fresco, para cada uno de los tipos de mezclas.

a. Asentamiento

Una vez concluido el proceso de mezclado se realizarán las medidas del asentamiento de acuerdo a la norma ASTM C 143, para posteriormente obtener las otras características físicas de las mezclas.

b. Trabajabilidad

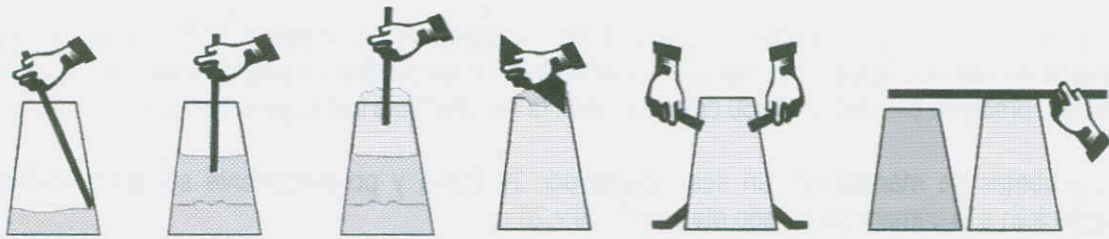
Se define como la facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado sin que se produzca segregación. Se especifica normalmente y en forma equivocada en términos de la medida del asentamiento.

Durante la etapa en que el concreto se mantiene en estado fresco es de gran importancia poder otorgarle facilidad en su manejo, de acuerdo al uso que se desea darle. Debido a que las fibras reducen la trabajabilidad del concreto fresco, se hace necesario determinar en qué proporción lo hacen.

Para cuantificar la trabajabilidad del concreto se medirá el asentamiento de cono. Este ensayo fue ideado por el investigador norteamericano Abrams. Su ejecución está regulada por la norma ASTM C 143 (Cuya norma completa se encuentra en el Anexo 4 de este mismo estudio) y consiste básicamente en rellenar un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas, en tres capas apisonadas con 25 golpes de varilla-pisón.

Posteriormente, se retira el molde y se mide el asentamiento que experimenta la masa de concreto colocada en su interior. Esta medición se complementa con la observación de la forma de derrumbamiento del cono de concreto, mediante golpes laterales con la varilla-pisón. De esta manera, la medida del asentamiento permite determinar la fluidez, y la forma de derrumbamiento permite apreciar la consistencia del concreto.

Figura 5.5. Proceso de la prueba de revenimiento.



7. Pruebas al concreto en estado endurecido

Una vez que pasen 24 horas de la fabricación de los especímenes, estos se deberán someter a un proceso de curado. Posteriormente, los ensayos a realizar serán la resistencia a la compresión, tensión indirecta y resistencia a la flexión, los cuales se realizarán para cada una de las 4 mezclas que se van a fabricar. Un resumen de los ensayos a realizar puede apreciarse en la Tabla 5.4.

Ensayo	Estado del concreto	Tipos de concreto	Edad del concreto
Trabajabilidad	Fresco	C-250, CF1, CF2, CF3	Menos de 30 min
Resistencia a la compresión	Endurecido	C-250, CF1, CF2, CF3	7 días
			14 días
Resistencia a la tensión indirecta	Endurecido	C-250, CF1, CF2, CF3	7 días
			14 días
Resistencia a la flexotracción	Endurecido	C-250, CF1, CF2, CF3	28 días
			28 días

Tabla 5.4 Pruebas a realizar en los especímenes.

a. Curado del concreto

El curado es el mantenimiento de la humedad adecuada y los regímenes de temperatura del concreto recién colocado por un período de tiempo inmediatamente posterior a su terminación. El curado incorrecto puede causar graves detrimentos en las propiedades del concreto a corto plazo (fisuración por retracción plástica) y a largo plazo (superficie menos durable y alabeo excesivo del concreto endurecido).

Los especímenes fabricados se apegarán a las normas para el curado del concreto en laboratorio (ASTM C 192) y a las prácticas estándar para ensayos de concreto en laboratorio (ASTM C 1077).

En cuanto a las pruebas destructivas del concreto estas se realizarán de acuerdo a las normas ASTM, tal como se describen para cada caso.

b. Ensayos de tensión indirecta en probetas cilíndricas

La prueba brasileña es actualmente uno de los métodos indirectos más usados para determinar la resistencia a la tensión del concreto debido a su facilidad de ejecución y reproducibilidad, por lo que por este método se evaluarán las características a la tensión de las mezclas de concreto fabricadas en el laboratorio.

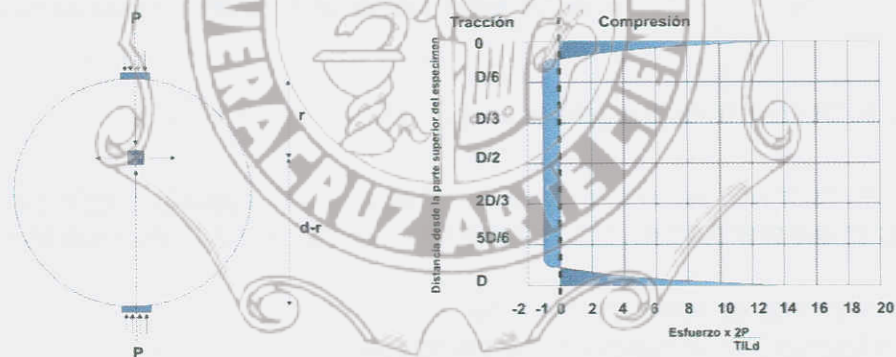
El ensayo se basa en la aplicación de carga sobre su diámetro a una probeta cilíndrica de concreto, para determinar su resistencia a la tensión. La prueba se realiza de acuerdo a la norma ASTM C 496.

El procedimiento de ensayo se resume a continuación:

- Ensayo

Se coloca un cilindro de concreto, con su eje horizontal entre las platinas de la máquina universal y se aumenta la carga hasta que ocurra la falla por tensión indirecta en forma de separación a lo largo del diámetro vertical.

Figura 5.6 Distribución del esfuerzo horizontal en un cilindro sometido a tensión indirecta.



Justo debajo de la carga se induce un alto esfuerzo de compresión y, en la práctica, tiras estrechas de un material de empaque, tal como la madera de triplay, se interpone entre el cilindro y las platinas. Sin las tiras de empaque, la resistencia registrada es menor, habitualmente en 8%, por lo que para este estudio se emplearán tiras de triplay de 3 mm de espesor y 25 mm de ancho de acuerdo a como lo establece la norma ASTM C 496.

- Resultados

Cuando la carga se aplica a lo largo de la generatriz, un elemento del diámetro vertical del cilindro queda sometido a un esfuerzo vertical de compresión tal como se muestra en la Figura 5.5. Dicho esfuerzo se calcula con la fórmula:

$$\sigma_v = \frac{2P}{\pi d} \left[\frac{d^2}{r(d-r)} - 1 \right] \quad (5.1)$$

Adicionalmente se induce sobre el espécimen un esfuerzo de tensión que se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\sigma_h = \frac{2P}{\pi d} \quad (5.2)$$

Donde:

- P = Carga de compresión del cilindro
- L = Largo del cilindro
- D = Diámetro del cilindro
- R y (D-r) = Distancias del elemento desde las dos cargas respectivamente

c. Ensayos de compresión en probetas cilíndricas

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes del concreto, siendo también el factor que se emplea frecuentemente para definir su calidad. La prueba se realiza de acuerdo a la norma ASTM C 39. Para cada uno de los especímenes, se obtendrá la carga aplicada y su carga de rotura.

El cabeceo de los cilindros en la prueba se apegará a la norma ASTM C 617.

El valor de la resistencia que se obtenga en el ensayo no será absoluto, puesto que depende de las condiciones en que sea realizado. Entre estas condiciones, las de mayor influencia son:

- Formas de los especímenes de ensayo
- Condiciones bajo las cuales se realiza la prueba
- Características del concreto
- Condiciones de temperatura y humedad

La resistencia se evaluará para los especímenes cilíndricos de las 4 mezclas fabricadas, para los 7, 4 y 28 días.

El procedimiento de ensayo, de acuerdo a la norma ASTM C 39 se resume a continuación:

- Medición de las Probetas.

Se miden dos diámetros perpendiculares entre sí aproximadamente a media altura, y la altura de la probeta en 2 generatrices opuestas antes de cabecearlo, aproximando a 1 mm. Se pesa el cilindro antes de cabecearlo, para obtener el peso volumétrico del material.

- Ensayo.

Se pone azufre a derretir, y una vez que se encuentra en estado líquido se vierte en el molde para cabeceo, se coloca encima del azufre líquido el cilindro y se asienta la probeta de concreto, se espera un par de minutos para retirar la probeta y se repite la operación para el otro extremo del cilindro.

Se deben limpiar las superficies de contacto de las placas de carga y de la probeta, colocando la probeta en la máquina de ensayo alineada y centrada. Las probetas se colocan asentadas en una de sus caras planas cabeceadas. Al acercar la placa superior de la máquina de ensayo se debe asentarla sobre la probeta a modo de obtener un apoyo lo más uniforme posible. La carga debe aplicarse en forma continua y sin choques a velocidad uniforme. Finalmente se registra la carga máxima expresada en kg.

- Resultados.

Se calcula la resistencia a la compresión del concreto mediante la siguiente fórmula

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (5.3)$$

Donde:

A = Superficie de carga (cm²)

P = Carga Máxima (Kgs)

d. Ensayos de flexión en viguetas

Se considera de interés determinar la resistencia a la flexión de las diversas mezclas de concreto, debido a su aplicación a pavimentos en zonas portuarias, por lo que un incremento de la resistencia a flexión por efecto de las fibras sería muy beneficioso. Se realizarán ensayos solamente a los 28 días.

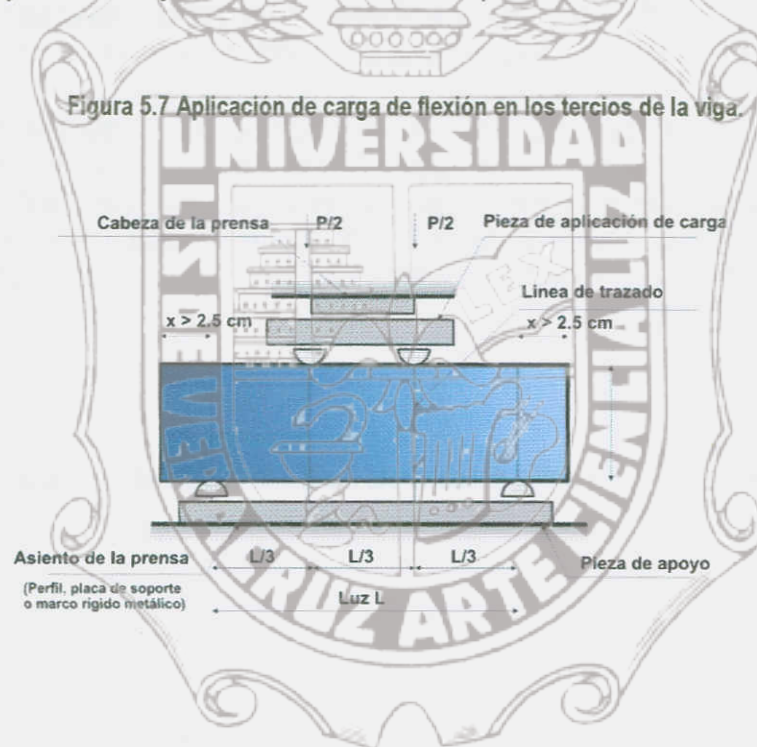
El procedimiento de ensayo se basa en la norma ASTM C 78 y consiste en someter a una vigueta de concreto simplemente apoyada, a una sollicitación de flexión mediante la acción de dos cargas

concentradas en los límites del tercio central de la luz de ensayo, para determinar la resistencia a flexión del concreto en función de la variación del porcentaje de fibras.

El procedimiento de ensayo de acuerdo a la norma ASTM C 78 se resume a continuación:

- Ensayo

- 1) Marcado y medición de las probetas: La distancia entre las líneas de apoyo y los extremos de la probeta debe ser igual o mayor a 2.5 cm.
- 2) Con líneas rectas, finas e indelebles se marcan sobre las cuatro caras mayores, las secciones de apoyo y de carga, que servirán para colocar y alinear la probeta en la máquina de ensayo.
- 3) Se limpian las superficies de contacto de la probeta y máquina de ensayo y se coloca la probeta alineada y centrada dejando la cara de llenado en posición vertical.



- 4) Se aplica hasta un 5% de la carga prevista de rotura verificando que los contactos cumplen las tolerancias.
- 5) Se continúa aplicando la carga en forma continua y sin choques de velocidad uniforme cumpliendo las siguientes condiciones:
 - Alcanzar la rotura en un tiempo igual o superior a 300 seg
 - Velocidad de aplicación de carga no superior a $10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$
 - Registrar la carga máxima (P) expresada en kgs

La aplicación de carga se deberá realizar hasta valores superiores a la deformación de rotura. Para el cálculo de la resistencia a la flexión se pueden presentar dos casos, para cada uno de los cuales se enuncian a continuación las fórmulas para su determinación.

- Resultados

1) Si la fractura de la probeta se produce en el tercio central de la luz de ensayo, se calcula la resistencia a la flexión como el módulo de ruptura, según la fórmula siguiente:

$$Mr = \frac{PL}{bd^2} \quad (5.4)$$

Donde:

Mr = Módulo de ruptura (kg/cm²)

P = Carga máxima aplicada (kg)

L = Luz de ensayo de la probeta (cm)

b = Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura (cm)

d = Peralte promedio de la probeta en la sección de rotura (cm)

2) Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de la probeta, en la zona comprendida entre la línea de aplicación de carga y una distancia de 0,05 L de esa línea, se calcula la resistencia a la flexión como el módulo de rotura, según la fórmula siguiente:

$$Mr = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (5.5)$$

en donde:

a = Distancia entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta, cm.

B.5 Análisis estadístico de los datos

Debido a que los valores de resistencia obtenidos cuando se ensayan varios especímenes de una misma mezcla de concreto hidráulico son variables y se muestra una dispersión cercana a la resistencia media, se hace necesario realizar un análisis estadístico.

La variabilidad en los resultados depende de las variaciones en los materiales de la mezcla, el procedimiento de muestreo, los cambios en la elaboración de la mezcla, la forma de elaboración de los especímenes y las variaciones en los ensayos.

A través de procedimientos estadísticos se obtendrán los resultados de resistencias promedio (\bar{X}).

C. FASE FINAL

C.1 Análisis de resultados

El análisis de los resultados deberá adaptarse a la estructura y diseño de la investigación que se ha descrito hasta el momento. Por lo tanto, corresponde realizar un análisis de resultados del estudio.

La interpretación de los resultados derivados de los estudios estadísticos, permitirá elaborar un primer informe de las pruebas realizadas a los agregados pétreos, el cual será la fuente de información en la que se fundamenta el diseño de las mezclas de concreto.

Para concluir la estrategia de esta fase, se categorizarán los resultados obtenidos para su posterior interpretación, la cual se detallará en el apartado de Análisis de datos de este mismo estudio.

La presentación final del informe se realizará a partir de los resultados de las pruebas de concreto y los modelos de simulación evaluados a partir del modelo matemático propuesto.

El resumen del diseño del trabajo de investigación se presenta en la Tabla 5.5.

MÉTODOS Y FASES	ESTUDIO CUALITATIVO		ESTUDIO CUANTITATIVO	
	1er Trabajo de laboratorio	2do Trabajo de laboratorio	Trabajo de Gabinete	
Muestra	Muestra de agregados pétreos de la región	Cilindros y vigas de concreto	Modelos matemáticos de simulación mediante computadora	
Instrumentos	Juego de mallas, báscula, cherojas, cucharón, palas, tubo de Chapman	Maquina Universal	Software RAM Advance	
Tratamiento de los datos	1. Transcripción de datos	1. Codificación y tabulación de datos		
	2. Reducción-categorización de datos	2. Análisis Estadístico Descriptivo		
	3. Codificación de datos			
	4. Integración de datos			
	5. Síntesis de datos			
Análisis de los resultados	Análisis de contenido		Análisis estadístico	
		Intracolectivos	Intercolectivos	
Presentación de resultados Triangulación metodológica	Informe de resultados cualitativos Explicativa (Información de contrase y profundización)		Informe de resultados cuantitativos Experimental y Descriptiva (Información panorámica)	
	Informe de resultados	Informe de resultados de las características de los agregados	Informe de resultados del comportamiento de las muestras de concreto	

Tabla 5.5. Resumen del diseño de la investigación.

C.2 Redacción y presentación final del documento

La última fase del trabajo será realizar la redacción final de los resultados, estas conclusiones serán realizadas en base a la información obtenida en el laboratorio. La presentación del informe final se estructurará exponiendo gráficamente los resultados, acompañados de la descripción verbal.

Una vez escrito el contenido general del trabajo, deberá ser revisado para garantizar la calidad del texto. De esta forma, se planificó una primera revisión por un experto en redacción y dos revisiones más realizadas por el director de tesis.

Los capítulos del documento obtenido de la investigación se redactarán en base al guión de trabajo y con el siguiente orden:

Introducción

Capítulo 1. Usos de las superficies terrestres, portuarias y características de las cargas

Capítulo 2. Dimensionamiento en pavimentos, procedimientos de cálculo y criterios de diseño

Capítulo 3. Fibras en la construcción, su obtención y estado del arte

Capítulo 4. Contexto de la investigación y planteamiento del problema

Capítulo 5. Planificación de la investigación

Capítulo 6. Metodología de la investigación

Capítulo 7. Primer Ensayo de laboratorio: Características de los materiales en el puerto de Veracruz

Capítulo 8. Segundo Ensayo de laboratorio: Elaboración de concreto con fibras PP

Capítulo 9. Interpretación de resultados: Influencia del porcentaje de fibra PP adicionado

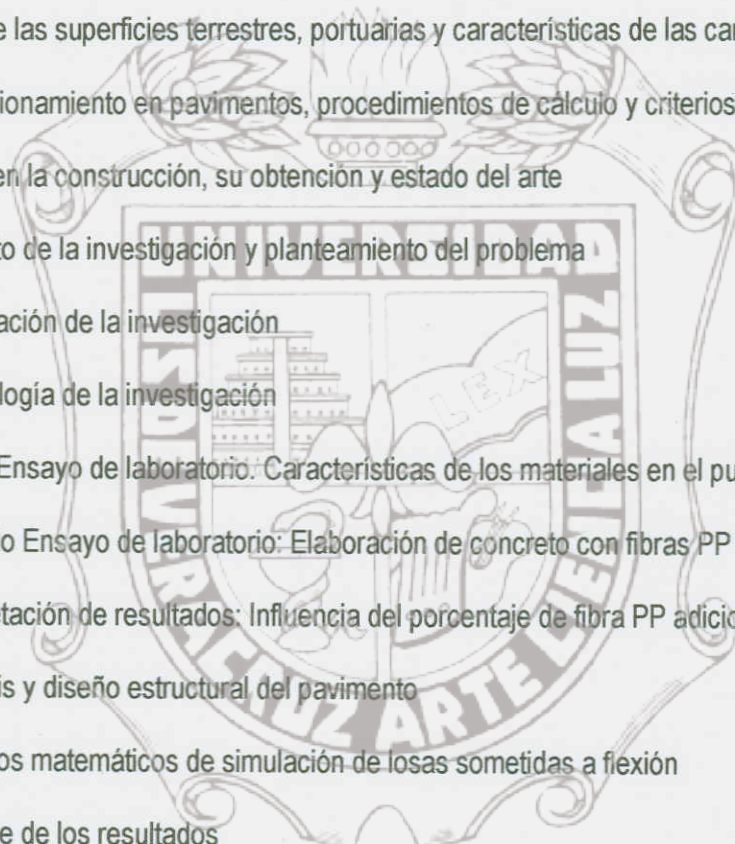
Capítulo 10. Análisis y diseño estructural del pavimento

Capítulo 11. Modelos matemáticos de simulación de losas sometidas a flexión

Capítulo 12. Informe de los resultados

Capítulo 13. Conclusiones

Capítulo 14. Prospectivas de la investigación





CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA
DE LA INVESTIGACIÓN

6.1 Planteamiento de la hipótesis

“El incremento de fibras PP a las mezclas de concreto hidráulico aumenta su resistencia a la tensión, reduciendo la tendencia al agrietamiento, en elementos placa con/sin apoyos laterales, como en el caso de los pavimentos”.

Finalmente, dentro de la investigación lo que se plantea es a través de modelos de simulación por computadora, evaluar la posibilidad de que las fibras PP actúen como refuerzo en el concreto, lo que sustituirá total o parcialmente a la malla electrosoldada, evitando los problemas de corrosión que se presentan en los pavimentos rígidos, reduciendo al mismo tiempo su costo.

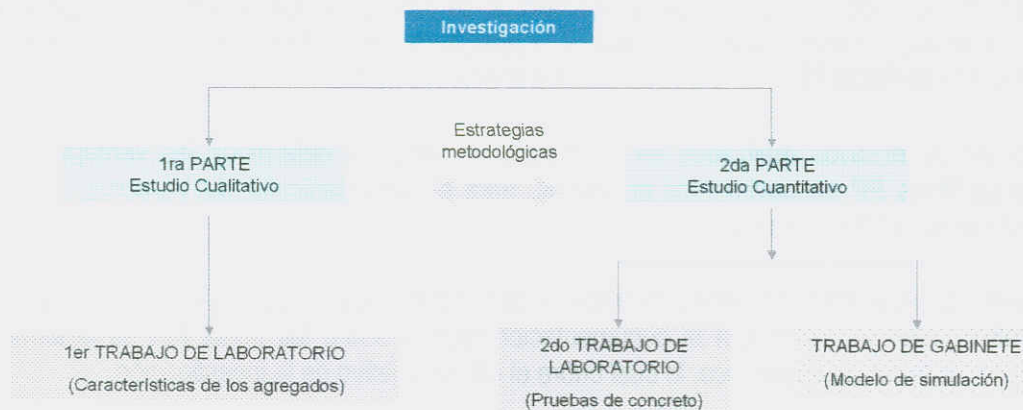
6.2 Metodología General

La metodología general de la investigación tal y como se definió en el capítulo anterior, se divide en dos partes; la primera corresponde al estudio cualitativo de los agregados pétreos; la segunda parte corresponde al estudio cuantitativo, el cual a su vez se divide en dos etapas.

La primera etapa corresponde a las pruebas de concreto realizadas en el laboratorio de materiales, la segunda etapa del estudio cuantitativo se refiere a la elaboración de un modelo de simulación por computadora con ayuda del software RAM Advance.

Es decir, existe una combinación de metodologías, cuyos resultados se van a relacionar entre sí mediante estrategias metodológicas, tal como se muestra en la Figura 6.1.

Figura 6.1. Combinación de metodologías.



La secuencia en la aplicación de la metodología está diseñada en función de los objetivos de la investigación. Siguiendo dicha secuencia, y en cumplimiento del primer objetivo referente a conocer los diferentes tipos de fibras sintéticas, se menciona en el capítulo 4 la clasificación de los tipos de fibras más comunes que existen en el mercado.

Para dar cumplimiento al segundo objetivo del estudio, el cual propone verificar las características de los agregados, se llevará a cabo el estudio cualitativo, el cual parte desde la determinación de las características de los agregados pétreos (arena y grava) de la región, como son peso volumétrico, granulometría, densidad, etc., los cuales varían de acuerdo a cada zona del país.

Así, la adición de fibras PP al concreto y el verificar su comportamiento busca dar cumplimiento al tercer objetivo de la tesis.

Con los datos obtenidos sobre las características de los materiales de la zona, se realizará el diseño de la mezcla patrón y posteriormente se confeccionarán tres mezclas adicionales con fibras PP, en incrementos de 0.25% en peso del cemento con valores hasta del 0.75%. Este procedimiento se llevará a cabo con la finalidad de cumplir el cuarto objetivo de la investigación, el cual es evaluar las propiedades mecánicas y la trabajabilidad de las diferentes mezclas de concreto.

En base a los resultados obtenidos, se pretende definir el comportamiento de estas mezclas, para cumplir con el quinto objetivo de esta investigación.

De este análisis se obtendrá el porcentaje óptimo de fibra PP para concretos con aplicación a pavimentos en la zona portuaria, con lo cual se dará cumplimiento al objetivo número seis propuesto en esta investigación.

El objetivo siete consiste en realizar un modelo de simulación por computadora que evalúe el comportamiento estructural de los pavimentos con y sin fibras; mediante el software Ram Advanse, el cual está basado en el Método de Elemento Finito.

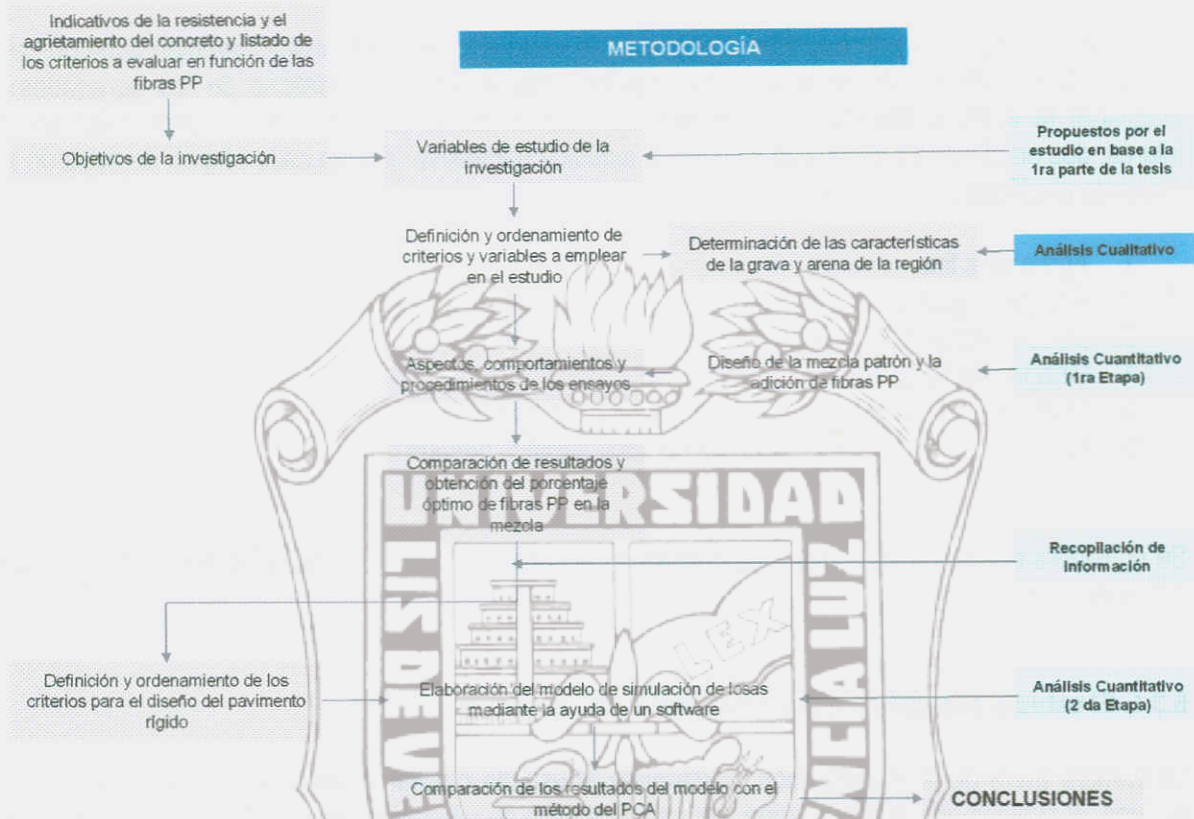
El octavo objetivo se centra en realizar un comparativo del comportamiento de las losas para tránsito pesado y ligero obtenido mediante el modelo de simulación previamente realizado.

Una vez identificados los parámetros de resistencia, se procede a utilizar una metodología de análisis para intentar llegar a conclusiones respecto a la posibilidad de sustituir o no a la malla electrosoldada por el empleo de fibras PP, con lo que se cumple el objetivo nueve.

A partir de los ensayos realizados en laboratorio se pretende determinar las ventajas técnicas del empleo de fibras PP en pavimentos portuarios, para el caso particular de Veracruz, con lo cual se cumplirá con el objetivo número diez.

Finalmente, de acuerdo a los datos obtenidos, a los comparativos realizados entre los modelos de losas para tráfico ligero y pesado y a la documentación técnica sobre las fibras PP, se determinará si el empleo de las fibras es económico, lo cual cubre el último objetivo de la investigación.

Figura 6.2. Pasos para la aplicación de la metodología.



La sustentación teórica del proyecto proviene de experiencias de ensayos y diseños realizados en otros países, para lo cual se adoptaron algunos supuestos basados en datos obtenidos en la primera parte correspondiente a los fundamentos teóricos de la investigación.

La secuencia en la metodología de la investigación descrita anteriormente se engloba de manera práctica en la Figura 6.2.

6.3 Definición y establecimiento de los elementos de análisis

Dentro de toda investigación, la población se define como el conjunto de todos los individuos (objetos, personas, eventos, etc.) en los que se desea estudiar el fenómeno. Éstos deben reunir las características de lo que es objeto de estudio.²⁵

La concreción de las poblaciones sobre las cuales se centra el estudio, se ha determinado en función de los objetivos de la investigación y del problema que en ella se aborda. Por esta razón la muestra

corresponde a los especímenes para ensayos de concreto y los modelos de simulación de losas macizas, en los cuales se han considerado todas las variables que constituyen a las unidades de análisis.

El estudio cuantitativo es el apartado principal de la investigación, sin embargo también cabe destacar la importancia del estudio cualitativo, ya que en base a las características de los agregados se diseñarán la diversas mezclas de concreto. De esta forma se han considerado seis colectivos de interés, dos en el estudio cualitativo y cuatro al estudio cuantitativo (dos en cada etapa), de acuerdo a la siguiente clasificación:

1. Agregados fino
2. Agregado grueso
3. Mezcla patrón (sin fibras)
4. Mezcla con fibras PP
5. Modelos de simulación de losas sometidas a tráfico ligero
6. Modelos de simulación de losas sometidas a tráfico pesado

Se considera que estos tres colectivos conforman el comportamiento del concreto reforzado con fibras PP en pavimentos.

6.3.1. El estudio cualitativo. Características de los agregados

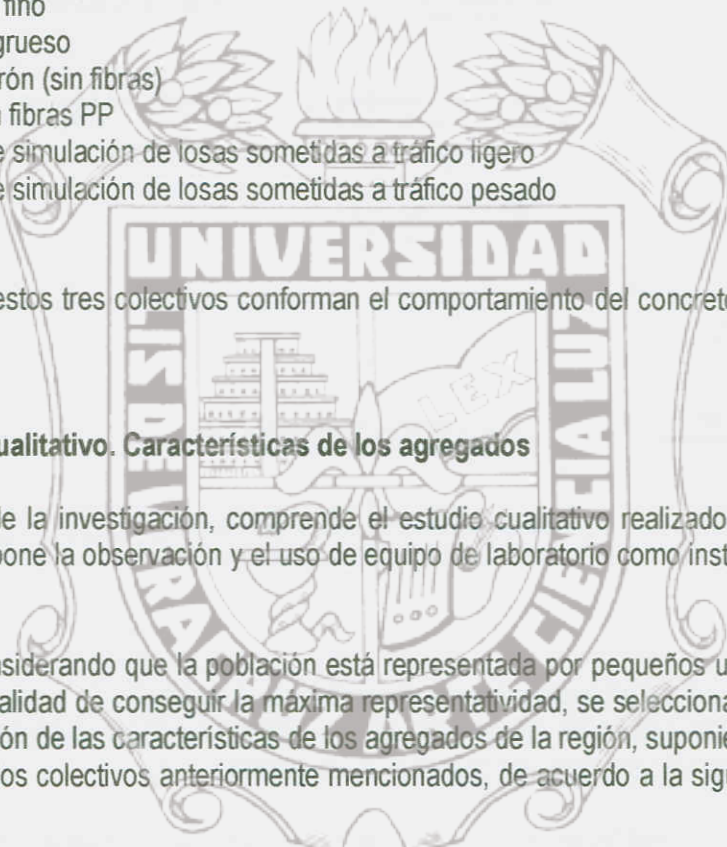
La primera parte de la investigación, comprende el estudio cualitativo realizado sobre los agregados pétreos, el cual supone la observación y el uso de equipo de laboratorio como instrumento de obtención de datos.

De esta forma, considerando que la población está representada por pequeños universos (poblaciones finitas); y con la finalidad de conseguir la máxima representatividad, se seleccionarán cinco parámetros para la determinación de las características de los agregados de la región, suponiendo cinco núcleos de información a los dos colectivos anteriormente mencionados, de acuerdo a la siguiente clasificación de las poblaciones:

- Población de agregados gruesos (obtención de muestra por cuarteos del material)
- Población de agregados finos (obtención de muestra por cuarteos del material)

Para el desarrollo del estudio cualitativo, se tomará una muestra representativa de cada colectivo de acuerdo a las normas ASTM, por lo que las unidades de análisis estarán formadas por una porción de cada una de las poblaciones anteriormente señaladas.

En la Tabla 6.1 se presenta el formato para el registro de la población de estudio, de acuerdo a las variables que se analizarán.



Criterio de selección de agregados							
Poblaciones	Granulometría			Densidad	Módulo de finura	Absorción	Peso volumétrico
	Mala	Regular	Buena				
Agregado grueso	1	2	3		(*)		
Agregado fino	1	2	3				

(*) No aplica

Tabla 6.1. Formato para el registro de la muestra del estudio cualitativo.

6.3.2 1ra Fase del estudio cuantitativo. Trabajos de laboratorio

La segunda parte de la investigación corresponde al estudio cuantitativo, el cual a su vez se divide en dos fases, la primera corresponde a los ensayos en el laboratorio de materiales de los especímenes de concreto; la segunda etapa incluye la elaboración de los modelos de simulación de losas por computadora.

Para determinar las propiedades del concreto se realizarán especímenes de ensayo para la prueba de flexión, compresión y tensión indirecta de acuerdo a las normas ASTM para ensayos de concreto en laboratorio, probando su resistencia final a los 28 días.

La determinación de la compresión y la tensión del concreto estarán basadas en pruebas sobre cilindros curados en el laboratorio¹⁷.

Para determinar la resistencia a la flexión, será necesaria la fabricación de especímenes de ensayo correspondientes a vigas. De esta forma ambos colectivos (concreto patrón y concreto con fibras), tendrán que evaluar tres núcleos de información para el concreto endurecido.

El número de especímenes a elaborar será de 48 cilindros para los ensayos de tensión indirecta y compresión, y 8 vigas para los ensayos de flexión, de modo que la muestra final del estudio cuantitativo estará compuesta por un total de 56 elementos, los cuales representarán los dos colectivos estudiados.

Los parámetros para determinar la resistencia del concreto patrón y del concreto reforzado con fibras PP, supone tres núcleos de información para los dos colectivos anteriormente mencionados, de acuerdo a la siguiente clasificación de las poblaciones:

- Cilindros para medir la resistencia a compresión
- Vigas para medir la resistencia a la flexión
- Cilindros para medir la resistencia a la tensión por medio de la prueba brasileña

La cantidad de unidades de análisis para cada colectivo se presentan en la Tabla 6.2.

Muestras de concreto	Cilindros para prueba de compresión	Viguetas a la flexión	Cilindros para prueba de tensión indirecta
Concreto patrón	6	2	6
Concreto reforzado con fibras PP	18	6	18
Total	24	8	24

Tabla 6.2. Muestra del estudio cuantitativo (1ra fase) de sus dos colectivos.

Finalmente, la muestra real analizada estará compuesta por el conjunto total de los elementos de análisis, que se puedan ensayar y que vayan a ser cuidadosamente fabricados, de este modo se obtendrá la muestra definitiva de la investigación cuantitativa en su primera fase.

A continuación se describen cada uno de los especímenes que se fabricarán, sus características y dimensiones, las cuales serán las unidades de análisis durante la investigación.

a) Cilindros de concreto

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros principales de diseño de concreto, por lo cual se evaluarán las características del concreto patrón y el concreto con fibras PP a la compresión.

Sin embargo, para pavimentos el principal parámetro de diseño es su resistencia a la flexión, aunque es bien conocido que el concreto ante esfuerzos combinados de flexión y de tensión tiene una baja resistencia.

Por esto la investigación considera necesario la adición de las fibras PP con el objetivo de incrementar esta resistencia y mejorar su comportamiento ante estas acciones, por lo cual se evaluará el comportamiento de la mezcla patrón y varias mezclas con diferentes porcentajes de fibras.

Los especímenes fabricados para la prueba de compresión y tensión indirecta serán cilindros de concreto de 15 x 30 cm. Las variables de estudio contempladas para estos especímenes serán la resistencia a la compresión y a la tensión a los 7, 14 y 28 días.

La prueba de compresión se realizará de acuerdo a la norma ASTM C 39 y la de tensión indirecta bajo la norma ASTM C 496.

En la tabla 6.3 se presenta la distribución de la población de los cilindros de concreto, de acuerdo a su edad de ensayo.

Muestras de concreto	Compresión			Tensión indirecta		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
Concreto patrón	2	2	2	2	2	2
Concreto reforzado con fibras PP	6	6	6	6	6	6
Total	8	8	8	8	8	8

Tabla 6.3. Distribución de la población de cilindros.

b) Viguetas de concreto

La resistencia a la flexión es uno de los elementos esenciales a considerar en el diseño de un pavimento de concreto, es por ello la importancia de su determinación. La variable estudiada será la resistencia a la flexión a los 28 días.

Los especímenes que se elaborarán para esta prueba son vigas de 15x 15 x 60 cm, las cuales se someterán a la prueba de los tres apoyos para evaluar su resistencia a la flexión de acuerdo con la norma ASTM C 78.

En la Tabla 6.4 se presenta la distribución de la población de las vigas de concreto, de acuerdo a su edad para los ensayos.

Muestras de concreto	Flexión 28 días
Concreto patrón	2
Concreto reforzado con fibras PP	6
Total	8

Tabla 6.4. Distribución de la población de vigas.

6.3.3 2da Fase del estudio cuantitativo. Trabajos de gabinete (elaboración del modelo de simulación)

Para evaluar el comportamiento de los pavimentos, las unidades de análisis serán los modelos de simulación de losas macizas elaborados por computadora.

Los modelos se analizarán en función del tránsito (pesado y ligero), y lo que se pretende determinar es si las fibras son un refuerzo adecuado, si puede sustituirse la tradicional malla electrosoldada por este tipo de refuerzo, así como presentar un comparativo de los resultados obtenidos por medio de la computadora.

Finalmente la comparativa de la capacidad de la losa para soportar los esfuerzos se realizará, suponiendo que la rotura de la misma sería por fatiga, flexión y/o erosión tal como lo determina el método tradicional del PCA.

Muestras de concreto	Modelo matemático de simulación de losas
Losa de concreto con tráfico ligero	2
Losa de concreto con tráfico pesado	1
Total	3

Tabla 6.5. Muestra de estudio cuantitativo (2da fase).

El criterio de determinación de la muestra se basa en buscar la representatividad del modelo matemático aplicado a la realidad, en base a un diseño preliminar realizado por el método del PCA y a criterio y experiencia profesional sobre estructuras portuarias, en cuanto a su comportamiento.

Los requisitos para realizar el análisis son tener relación directa o influencia sobre el problema objeto de estudio y desempeñar un punto clave para el desarrollo de la resistencia en el diseño final del pavimento, es decir, ante las dos condiciones de tráfico mostrado en la Tabla 6.5 se pretende encontrar un patrón de comportamiento que defina hasta que punto es posible sustituir las fibras PP en las losas en lugar de la tradicional malla electrosoldada, en caso de que esta sustitución sea posible.

6.4 Variables de estudio

Una vez que se ha alcanzado un conocimiento relativamente amplio del tema a investigar, como son sus antecedentes, aspectos principales y enfoques más usuales, se debe aislar dentro del problema, los factores más importantes que en él intervienen.

Para ello, se ha delimitado la investigación a pavimentos portuarios exclusivamente en Veracruz, planteando la problemática y los subproblemas diferenciales que existen, ordenándolos lógicamente y relacionándolos de acuerdo a su propia naturaleza. De allí, surgen las características y factores básicos que forman parte del problema y a través de los cuales se puede explorar, describir, explicar y ensayar los patrones de comportamiento buscados en el concreto reforzado con fibras PP.

Los factores descritos en la primera parte de la investigación, se estudiaron hasta formularlos en forma de cualidades o características y se determinó como se entrelazan en el fenómeno a investigar de donde surge la base teórica presentada en la primera parte de la tesis, sobre la cual se apoya la investigación.

En base a esta referencia teórica del problema, se pudo esquematizar un conjunto de elementos interdependientes a los cuales es posible medir de alguna forma y a los cuales se les denomina *variables* del estudio experimental.

En la investigación existen dos tipos de variables, la variable independiente y la variable dependiente, tal y como muestra su definición:

Variable independiente (VI). Es la característica que el investigador observa o manipula deliberadamente para conocer su relación con la variable dependiente. La VI es la relación antecedente de un efecto; responde a la idea de causa. A veces se le denomina con los nombres de estímulo, experimental o tratamiento. Por lo tanto en la primera parte de la investigación, la VI corresponde al porcentaje de fibras PP adicionada en intervalos del 0.25% a las mezclas de concreto, por lo cual es una variable a *intervalos iguales*.

En la formulación de la hipótesis se reconoce a la VI como el antecedente y a la VD como el consecuente. En los experimentos en sentido estricto, la VI es manipulada por el investigador, convirtiéndose, en terminología de Kerlinger, en una variable activa.²⁵

Variable dependiente (VD). Es la característica que aparece o cambia cuando el investigador aplica, suprime o modifica la variable independiente. Se denomina criterio y corresponde a la idea de efecto producido por los cambios de la VI²⁵. En esta investigación, la VD es la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto en sus diferentes modalidades.

La primera parte del estudio no contiene variables dependientes ya que tampoco existe una variable independiente que se manipule, debido a que solo se pretenden conocer las características de los agregados tal y como se encontraron en estado natural.

Estos valores a pesar de ser numéricos (módulo de finura, absorción, etc) finalmente solo son indicativos de una arena o grava gruesa, media o fina.

A diferencia de esto, en la primera parte del estudio cuantitativo la VD corresponderá a los valores de las resistencias (compresión, tensión, módulo de ruptura y trabajabilidad) en las diferentes mezclas de concreto por elaborar.

Asimismo, las variables dependientes cuantitativas de la segunda fase del estudio son también *variables continuas*, es decir, variables que pueden tomar cualquier valor dentro del rango de resistencias.

6.4.1 Clasificación de las variables de estudio: categorías

Considerando lo expresado anteriormente, y con objeto de conocer el comportamiento de los pavimentos, se han seleccionado una serie de categorías comunes al objetivo de análisis.

Tal y como se ha presentado en la primera parte de la investigación, estos indicativos surgen de la fundamentación teórica del tema en estudio. En este análisis se puede comprobar que existen una serie de temas que los distintos autores, de una u otra manera, presentan como aspectos íntimamente relacionados con el conocimiento de la resistencia del concreto y el diseño de pavimentos.

Luego de precisar los factores que intervienen en el problema, de haberlos definido y analizado hasta determinar el tipo de condicionamiento que los unen, se obtiene un conjunto de variables relacionadas entre sí de una cierta forma particular para cada uno de los ensayos en laboratorio, las cuales se pueden dividir en dos etapas, la primera corresponde a las variables que regulan las pruebas de concreto, y la segunda parte está referida al análisis estructural de losas de concreto realizado mediante el modelo de simulación para dos tipos de tráfico distintos.

En cada uno de los casos, las variables condicionantes son diferentes, por lo que se organizan para cada caso, de modo tal que se pueda construir un esquema coherente que exprese el cuadro general del problema.

Estos temas constituyen las categorías o variables de estudio de la investigación, y para las pruebas del concreto, existen 6 variables, las cuales son:

- Variable 1: El porcentaje de fibras PP (VI)
- Variable 2: Trabajabilidad (VD) – Estado fresco
- Variable 3: La resistencia a la compresión (VD) – Estado endurecido
- Variable 4: La resistencia a la tensión (VD) – Estado endurecido
- Variable 5: La resistencia a la flexión (VD) – Estado endurecido
- Variable 6: El control del agrietamiento (VD) – Estado endurecido

En cuanto al diseño estructural del pavimento a través del modelo de simulación por medio del software, se manejarán cuatro variables, para verificar cuales son las condiciones que más se acercan a la realidad. Estas variables son:

- Variable 1: El tráfico (pesado y ligero) (VI)
- Variable 2: Los momentos máximos en la placas (VD)
- Variable 3: El refuerzo de la losa (malla electrosoldada o fibras PP) (VD)
- Variable 4: Los esfuerzos en la placa (VD)

6.5 Definición conceptual de las variables de estudio

Es interesante conocer el comportamiento del concreto tras la adición de fibras PP en la mezcla, mediante la determinación de su resistencia a la flexión, compresión, tensión, etc, utilizando para ello las variables de relación e influencia en la resistencia y trabajabilidad del concreto, cada una de las cuales se explican a continuación.

6.5.1. Variable Independiente

Se conoce como variable independiente a la que origina o se considera la causa del fenómeno que va a ser estudiado.

- Variable 1: El porcentaje de fibras PP

La variable principal corresponde al porcentaje de fibras de polipropileno incorporadas a las mezclas de concreto. Ya que es la que provoca la variación en la resistencia de los especímenes de muestra y la que gobierna el fenómeno de la resistencia a la flexión, compresión y tensión, las cuales están en función de esta variable.

Es una variable cuantitativa porque se puede medir, el experimento se centra en la medición del porcentaje de fibras PP, que se adicionan al concreto como un porcentaje del peso del cemento de la mezcla existente.

Atendiendo a los intereses de la investigación, se adoptarán valores inferiores al uno por ciento con incrementos de 0.25 por ciento de fibras al peso de la mezcla.

Otras causas del fenómeno de la resistencia son

- La relación $a/c = 0.58$ (agua-cemento) en la mezcla, por lo cual es muy importante el cálculo de la misma en el diseño de la mezcla. Sin embargo, en esta investigación la relación a/c no se considera como una variable, pues en los cuatro tipos de muestras por realizar se conservará la misma relación.
- La calidad de los materiales (agregados grueso y fino) y que estén libres de impurezas; para lo cual previo a la fabricación de las mezclas se lavará el agregado grueso.

Por lo tanto, estas causas no intervendrán como variables en el fenómeno de la resistencia del concreto, debido a que los agregados serán los característicos de la zona del puerto de Veracruz y no se ensayarán especímenes con distintos tipos de agregados.

6.5.2. Variables dependientes

Estas son la consecuencia de la variable principal, es decir, de la adición de las fibras PP en el concreto, para el caso particular de este estudio, las variables dependientes corresponden a la resistencia de los especímenes fabricados.

La consecuencia del incremento de fibras de polipropileno

- Variable 2: La trabajabilidad en las mezclas

La cual se define como la facilidad de colocación, consolidación y terminación del concreto en estado fresco, sin que se produzca segregación, el objetivo es determinar como se comportan las mezclas de concreto conforme la adición de fibras se incrementa en ellas. La prueba se realizará de acuerdo con la norma ASTM C143.

- Variable 3: La resistencia a la compresión

Con el ensayo de cilindros mediante la norma ASTM C 39, esta prueba se centra exclusivamente en la resistencia a la compresión del concreto con fibras PP, comparando la resistencia obtenida para los diversos porcentajes de fibras adicionadas a cada tipo de mezcla.

- Variable 4: La resistencia a la flexión

La cual se obtendrá mediante el ensayo de vigas de acuerdo a la norma ASTM C 78 haciendo un comparativo entre los especímenes con fibras y los especímenes fabricados con la mezcla patrón; para evaluar el comportamiento a la flexión de los elementos conforme el volumen de fibras de polipropileno se incrementa en los especímenes.

- Variable 5: La resistencia a la tensión

Esta variable contempla la resistencia a la tensión determinada mediante la aplicación de la norma ASTM C 496, como un aspecto importante en la posibilidad de sustituir la malla electrosoldada por un porcentaje adecuado de fibras PP en un pavimento.

- Variable 6: El control del agrietamiento

La variable contempla la evaluación del agrietamiento del concreto como resultado del efecto de contracción y retracción del concreto por secado, por lo que se busca indagar la posible mejoría del concreto tras la adición de las fibras.

Los resultados de esta variable pueden ayudar a determinar el potencial de mejoramiento que este tipo de fibras pueden tener en el concreto, y la relación entre la evaluación del agrietamiento y los problemas de corrosión del acero de refuerzo en las estructuras.

6.6 Definición conceptual de las variables del estudio en los modelos de simulación

Para conocer el comportamiento de una losa de concreto sometida a efectos de flexión, fatiga y/o erosión, como tradicionalmente se ocupan en los pavimentos será necesaria la elaboración de un modelo de simulación con ayuda de la computadora, por medio del programa RAM Advanse.

Tras evaluar el comportamiento del concreto con fibras en el laboratorio, y encontrar el porcentaje óptimo de estas en las mezclas, se pretende representar el efecto de su adición al concreto en una placa de pavimento tras ser sometida a las cargas que comúnmente transitan en las zonas portuarias.

Ahora a efectos de pavimentación las variables se centran sobre la posibilidad de sustituir total o parcialmente la malla electrosoldada en pavimentos mediante el empleo de un concreto reforzado con fibras sintéticas de polipropileno, para que resistan los esfuerzos impuestos por las cargas actuantes.

Las variables involucradas en las diferentes metodologías de diseño de pavimentos tienen gran influencia en el resultado final, pues la determinación de dichas variables influye técnica y económicamente en el diseño definitivo.

Si las variables no son estimadas de una manera objetiva, el resultado puede ser un pavimento sobrediseñado, o en el caso contrario subdiseñado, lo cual compromete considerablemente los costos y la vida útil del pavimento en estudio.

Para estar seguros que el modelo matemático representará las condiciones reales de cargas y esfuerzos a los que va a estar sometido el pavimento, primeramente se diseñará un pavimento por el método del PCA. En base a los resultados obtenidos se irá calibrando el modelo de simulación virtual, hasta conseguir que los resultados proporcionados por el análisis estructural sean los adecuados.

Cada una de las variables que intervienen en la modelación del fenómeno se explica a continuación.

6.6.1 Variables independientes

Es la que origina o se considera la causa del fenómeno que va a ser estudiado.

- Variable 1: Tipo de tráfico

Se analizarán dos tipos de condiciones en los pavimentos, cuando están sometidos a tráfico pesado y a tráfico ligero, ya que ambas condiciones se presentan en las zonas portuarias, simplemente esto va en función de la zona de operación dentro del puerto.

6.6.2 Variables dependientes

Estas son la consecuencia de la variable principal, es decir, el tipo de refuerzo en las losas afectará el comportamiento de las mismas, para el caso particular de este estudio, las variables dependientes corresponden a la resistencia de las losas de concreto.

La consecuencia del tipo de tráfico

- Variable 2: Los momentos máximos en las placas

De los valores de los momentos máximos que se generen en las placas, dependerá si el refuerzo es a base de malla electrosoldada o acero, o bien si la fibra de polipropileno es capaz de sustituir al refuerzo tradicional.

Debido a esto, los resultados de esta variable ayudarán a determinar la factibilidad o no de sustituir la malla electrosoldada por el empleo de fibras PP.

- Variable 3: El refuerzo de la losa

Atendiendo a los intereses de la investigación se ha introducido como variable el refuerzo en el modelo a escala de la losa, la cual tendrá las mismas dimensiones, pero diferente sistema de refuerzo.

Para lo cual se someterán los modelos a dos tipos de tráfico (pesado y ligero. Finalmente se realizará un comparativo del tipo de refuerzo que requiera el pavimento, para compararlos entre sí y evaluar los casos en los cuales sea posible la sustitución de la malla electrosoldada por el refuerzo a base de polipropileno.

- Variable 4: Los esfuerzos en la placa

Se centra exclusivamente en los esfuerzos por flexión del pavimento, la variable es contemplada en la evaluación como un aspecto que influye en el diseño del pavimento.

Mediante esta variable, se pretende evaluar la relación entre la equivalencia de armado del acero de refuerzo con el porcentaje óptimo de fibras PP adicionadas a las mezclas de concreto que conformarán las losas.

Finalmente, a través del análisis de estas variables, se podrán obtener conclusiones relacionadas con el uso de las fibras PP en los pavimentos de la zona portuaria.

6.7 Indicadores e índices

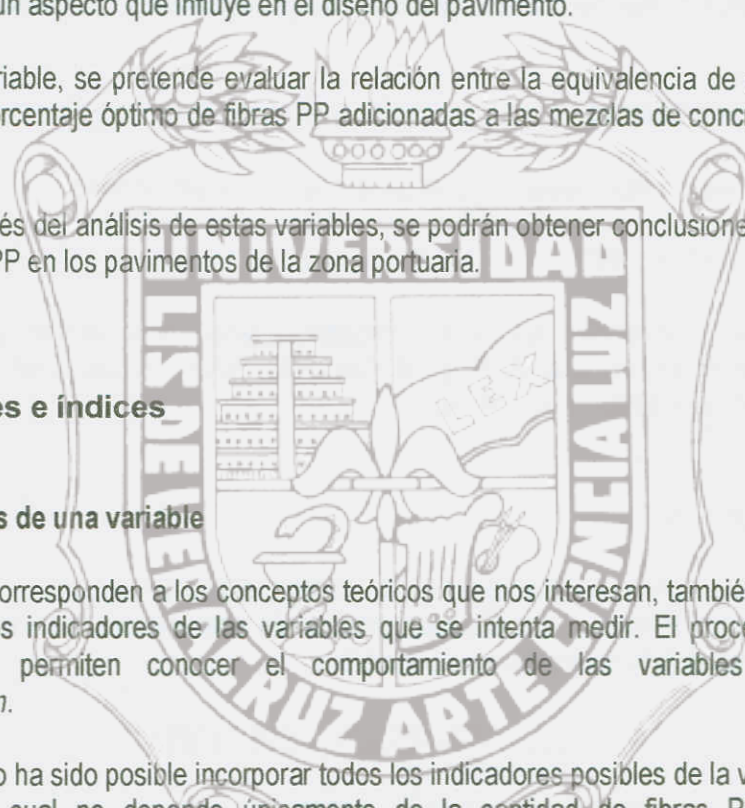
6.7.1. Indicadores de una variable

Los hechos que corresponden a los conceptos teóricos que nos interesan, también llamados correlatos empíricos, son los indicadores de las variables que se intenta medir. El proceso de encontrar los indicadores que permiten conocer el comportamiento de las variables se conoce como *operacionalización*.

En este estudio no ha sido posible incorporar todos los indicadores posibles de la variable de resistencia del concreto, la cual no depende únicamente de la cantidad de fibras PP, como se explicó anteriormente. En consecuencia, se escogieron los que más directamente reflejan el concepto de referencia y que pueden medirse con mayor facilidad y confianza con los instrumentos de que se dispone en el laboratorio de materiales.

Lo mismo sucede con los indicadores del comportamiento del modelo de simulación de las losas en pavimentos, ya que, en ambos casos para operacionalizar las variables fue necesario partir primeramente de la definición teórica que ya se había elaborado previamente.

En ambos casos la variable independiente se define a partir de un conjunto de indicadores y no solamente desde el punto de vista teórico, con lo que se llegó a la definición operacional de la variable.



6.7.2. Escala de medición

Las escalas **ordinales** distinguen los diferentes valores de la variable jerarquizándolos simplemente de acuerdo a un rango. Establecen que existe una graduación entre uno y otro valor de la escala, de tal modo que cualquiera de ellos es mayor que el precedente y menor que el que le sigue a continuación. Sin embargo, la distancia entre un valor y otro queda indeterminada.

Este tipo de escala se emplearán en la primera parte de la investigación durante el análisis cualitativo para determinar las características granulométricas de los materiales; es decir, serán para definir si la arena es fina, gruesa, etc, en base a un valor obtenido en el laboratorio.

Las escalas de **intervalos iguales**, además de poseer la equivalencia de categorías y el ordenamiento interno entre ellas, como en el caso de las ordinales, tienen la característica de que la distancia entre sus intervalos está claramente determinada y que estos son iguales entre sí.

Este tipo de escalas se usará para medir los incrementos de fibras PP a las mezclas de concreto con incrementos de 0.25 por ciento en peso del cemento.

Su limitación es que no definen un cero absoluto, un valor límite que exprese realmente la ausencia completa de la cualidad medida. Por ello no se pueden establecer equivalencias matemáticas como las de proporcionalidad.

6.8 Clasificación de las variables de análisis

Se entiende por variables de análisis a aquellas que responden a las características particulares de cada colectivo y que permitirán, por un lado, realizar el análisis de la resistencia del concreto patrón y el concreto reforzado con fibras PP, estableciendo las posibles diferencias significativas entre sus resultados.

Colectivo	VARIABLES DE ANÁLISIS
(*)Agregado fino y grueso	Granulometría Densidad Modulo de finura Absorción Peso volumétrico
Concreto patrón y concreto reforzado con fibras PP	Porcentaje de fibras PP La resistencia a la compresión La resistencia a la flexión La resistencia a la tensión El control del agrietamiento
Modelos de simulación de losas reforzadas con malla electrosoldada y con fibras PP	El refuerzo de la losa Tipo de tráfico (pesado y ligero) Los momentos máximos en la placa Los esfuerzos en la placa

(*) En el colectivo de análisis del estudio cualitativo aunque algunas variables son cuantitativas, la clasificación de la granulometría de los agregados solamente se empleará con fines de diseño de la mezcla de concreto para el estudio cuantitativo.

Tabla 6.6. Clasificación de las variables de análisis.

Finalmente, de los resultados de cada colectivo; se puede evaluar la posibilidad de sustituir el refuerzo a base de malla electrosoldada por fibras PP en los pavimentos.

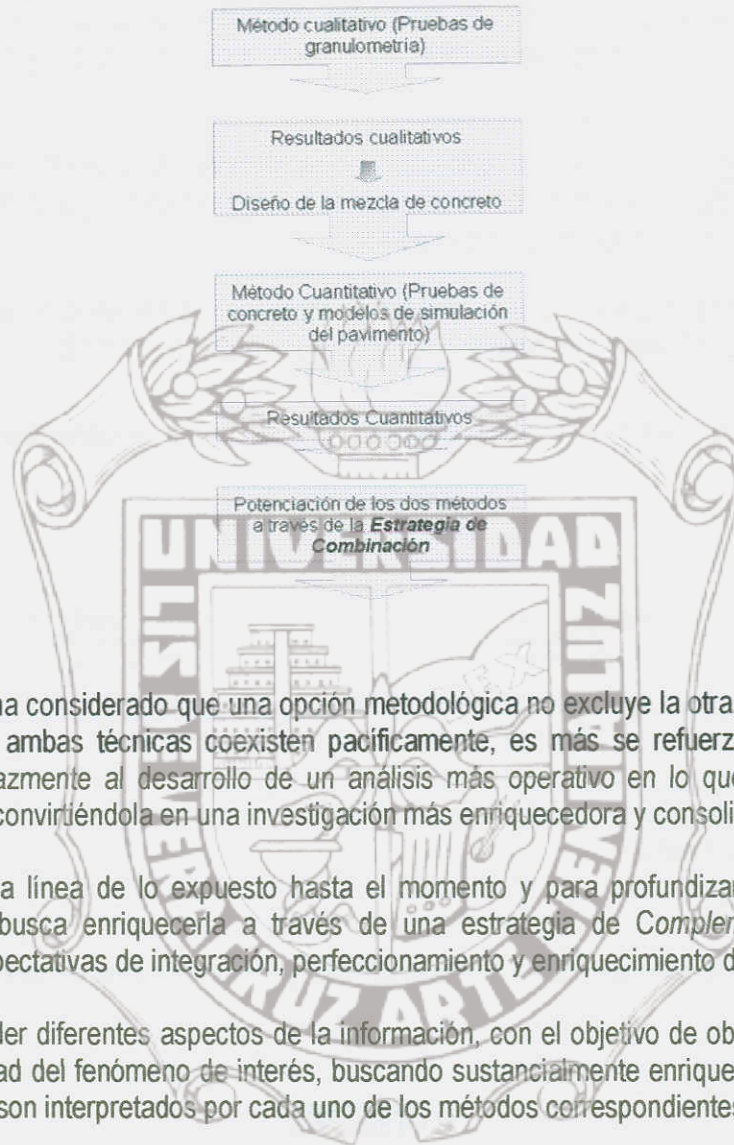
6.9 Estrategia metodológica

En el capítulo anterior referente al diseño de la investigación, se hizo mención de la estrategia metodológica o método general de la investigación seleccionado para la obtención de datos y su posterior análisis.

Como se manifestó con anterioridad se pretenden emplear técnicas cualitativas y cuantitativas considerando que esta opción corresponde a una vía metodológica plural e integradora, la cual se estimó adecuada para el desarrollo de la investigación tomando en consideración el diseño preestablecido.

Se ha dado prioridad a la metodología cuantitativa, ya que las características de la investigación descriptiva y correlacional, se adecuan en mayor medida al objeto de estudio de la investigación, proporcionando la situación panorámica del problema que se ha planteado previamente. Los datos cualitativos participan únicamente como información de contraste, complementando y profundizando el análisis del problema.

Figura 6.3. Aplicación de la Estrategia de “Combinación” en la Investigación.



Por esta razón se ha considerado que una opción metodológica no excluye la otra, sino que en nuestro ámbito de estudio ambas técnicas coexisten pacíficamente, es más se refuerzan y complementan, contribuyendo eficazmente al desarrollo de un análisis más operativo en lo que a la utilización del método se refiere, convirtiéndola en una investigación más enriquecedora y consolidada.

Siguiendo la misma línea de lo expuesto hasta el momento y para profundizar aún más en la vía metodológica, se busca enriquecerla a través de una estrategia de *Complementación*, buscando responder a las expectativas de integración, perfeccionamiento y enriquecimiento de la tesis.

Se considera atender diferentes aspectos de la información, con el objetivo de obtener una visión más amplia de la realidad del fenómeno de interés, buscando sustancialmente enriquecer el análisis. Por lo que los resultados son interpretados por cada uno de los métodos correspondientes en un informe final:

MÉTODOS →	ESTUDIO CUALITATIVO		ESTUDIO CUANTITATIVO			
FASES ↓	1er Trabajo de laboratorio		2do Trabajo de laboratorio		Trabajo de gabinete	
Análisis de los resultados	Análisis de contenido		Análisis estadístico		Análisis Descriptivo	
			Intravariables	Intervariables	Intravariables	Intervariables
Presentación de resultados	Informe de resultados cualitativos		Informe de resultados cuantitativos			
	ESTRATEGIA DE COMPLEMENTACIÓN					
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Informe de resultados: Capítulo 13	Informe de resultados de las características de los agregados		Informe de resultados colectivo concreto patrón	Informe de resultados colectivo concreto con fibras PP	Informe de resultados colectivo losas con tráfico pesado	Informe de resultados colectivo losas con tráfico ligero

Tabla 6.7. Estrategia metodológica de “Complementación” en la investigación.

Operativamente se hace uso de los resultados de los datos cuantitativos del análisis de las muestras de concreto ensayadas en el laboratorio de materiales, para elaborar el modelo de simulación para el análisis estructural de las losas que se pretenden aplicar a pavimentos, tal y como se expresa en la Figura 6.3.

La tercera estrategia se refiere a la aplicación de las distintas técnicas de investigación, lo que se aproxima al concepto de *Triangulación de técnicas* entre los métodos, y garantiza la compensación de las carencias e imperfecciones de los dos sistemas.

Estas estrategias proporcionan a la tesis el valor de control de calidad de la investigación, pues ambos se complementan e influyen notablemente a acrecentar la validez del análisis.

Figura 6.4. Aplicación de la Estrategia de "Triangulación" en la Investigación.



De acuerdo a la descripción presentada anteriormente la estrategia metodológica empleada en la investigación se representa en la Figura 6.5.

Figura 6.5. Representación gráfica de la estrategia metodológica de la investigación.



Instituto de Ingeniería
Universidad de Veracruzana

6.10 Técnica de recolección de datos

Tal y como se expuso en el apartado anterior, y como resumen de lo expresado hasta el momento respecto a la propuesta metodológica y a las técnicas de investigación, por el contexto del estudio se seleccionó el método más adecuado para abordar el problema de investigación, por lo que se ha optado por el empleo de la estrategia de Triangulación.

En este sentido y considerando el tipo de información deseada, el contexto de la investigación y la combinación de metodologías, se han optado por las siguientes técnicas o instrumentos de recolección de datos:

1) Estudio Cualitativo

- El carácter interpretativo: de las pruebas realizadas en el laboratorio.
- El carácter descriptivo: Estos es en relación a los fenómenos observados en el laboratorio.

2) Estudio Cuantitativo

- Normativo: Para la reproducción del fenómeno de la resistencia del concreto, a través de la aplicación de los ensayos en laboratorio de las normas ASTM que rigen las pruebas.
- Experimental: Mediante la manipulación de la variable independiente para evaluar el comportamiento de los especímenes.

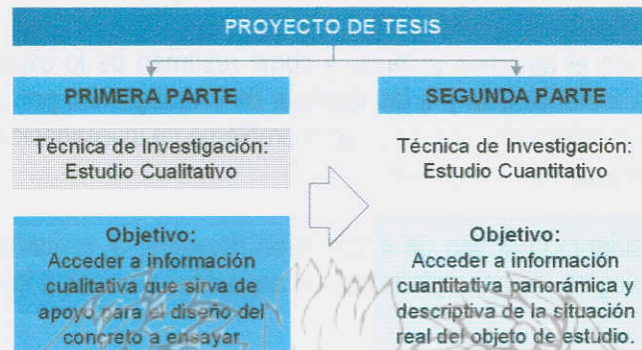
Resulta un hecho evidente que la investigación cuantitativa se realiza a través de procedimientos experimentales, los cuales son observados y se aplican a problemas finitos.

La elección de cada instrumento queda plenamente justificada por evidenciarse a la observación como una parte fundamental del método científico, siendo además la herramienta más adecuada para generar información interpretativa o de carácter cualitativo, como son las características de los agregados.

En cuanto a la investigación cuantitativa se considera a la experimentación de laboratorio como el procedimiento idóneo para acceder a la segunda parte del estudio.

Con la ejecución de la propuesta multimétodos (combinación de técnicas cualitativas y cuantitativas), se pretende lograr conclusiones lo más válidas y completas posibles mediante los datos producidos a través del empleo de ambas metodologías.

Figura 6.6. Técnica de recolección de datos y objetivos buscados.



Una vez determinados los instrumentos de obtención de los datos se debe realizar la planificación del proceso y su tratamiento. Así para recoger los indicativos de la influencia de las fibras PP en el concreto, estos suponen el punto de partida para la determinación de los objetivos, que a su vez se tradujeron en variables de estudio de la investigación.

Una vez determinados los instrumentos de obtención de datos, se debe plantear como realizar el modelado del sistema estructural para que sea representativo del pavimento. Con la finalidad de obtener los datos de la investigación de la forma más adecuada y fiable posible, se emplearán los siguientes criterios:

- Grado de idoneidad de los instrumentos en función del objeto de estudio y su contenido

Se considera que al tratar de mejorar la tecnología del concreto, la experimentación en laboratorio ofrece calidad en la medición de sus variables, y la posibilidad de investigación en base a los objetivos del proyecto.

- Grado de idoneidad de los instrumentos en función del método de investigación (cualitativa y cuantitativa) y de la estrategia metodológica (descriptiva, correlacional, explicativa y experimental)

La experimentación en laboratorio debe proporcionar los datos cuantitativos de forma que, a través de su análisis, se pueda elaborar una descripción lo más objetiva posible del comportamiento de los especímenes en relación al problema objeto de estudio de la investigación.

Al mismo tiempo, debe ofrecer la opción de correlacionar las variables de estudio con la finalidad de indagar y profundizar en los aspectos de relación e influencia sobre el tema objeto de estudio.

Asimismo, la experimentación debe aportar la información cuantitativa y más subjetiva, que permita contrastar, ampliar y explicar, ofreciendo soluciones y alternativas a la realidad del fenómeno.

- El rigor, la aplicación de las normas en cuestión y la calidad de su aplicación

Las pruebas de laboratorio estarán basadas en las normas ASTM, en cuanto a criterios de fiabilidad, seguridad y validez, a fin de que los resultados obtenidos de la investigación puedan ser utilizados y aprovechados posteriormente en forma adecuada.

- Grado de idoneidad de los instrumentos en función de la población de estudio

Como se mencionó anteriormente las normas ASTM se aplicarán a las pruebas destructivas de los especímenes de concreto, sin embargo en lo relativo al diseño del pavimento, con la finalidad de apegarse lo más posible a las condiciones reales se realizará el diseño estructural mediante un modelo de simulación.

La calibración del modelo se realizará mediante la comparación con un diseño tradicional realizado por el método de PCA, ampliamente usado y aceptado para el diseño de pavimentos de concreto, todo esto por la búsqueda de apegarse en lo más posible a la realidad.

6.11 Procedimiento de investigación. Trabajo de laboratorio

Una vez determinados los instrumentos de medida en el laboratorio, se expone el proceso de aplicación de los mismos, con todos sus procedimientos.

En este punto se trata sobre el proceso de elaboración de las pruebas de laboratorio, así como todos los aspectos que intervienen en el diseño del pavimento.

Partiendo del principio de que los ensayos en el laboratorio es la técnica o instrumento de recolección de datos, se exponen a continuación las fases en que se estructura el desarrollo global de dicho estudio con el objetivo de situar a las pruebas de laboratorio en el conjunto del proceso:

- Planeación (preparación)
- Laboratorio (realización)
- Análisis (tratamiento de los datos)

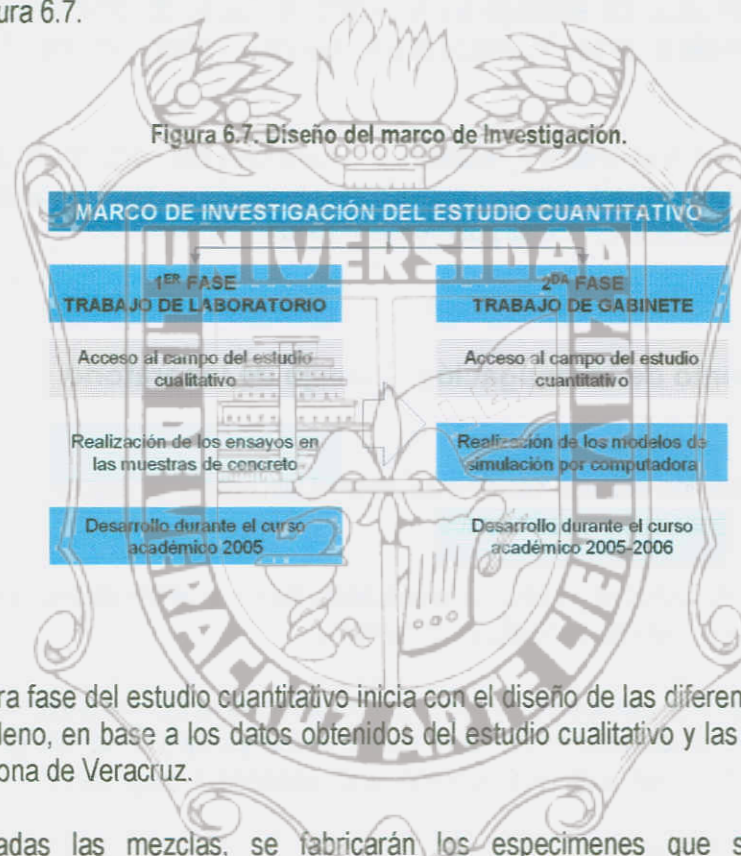
En la realización de las pruebas de laboratorio, hay que tener en cuenta los objetivos de la investigación así como la formulación del problema objeto de estudio, lo cual supone el elemento básico para la modelación del comportamiento de pavimentos portuarios.

Con estas pruebas se pretende seguir una secuencia, la cual se sintetiza en los siguientes puntos:

- Especificar las variables que se pretenden medir
- Construir los aspectos que reflejan la variable de medición
- Fabricar los especímenes de prueba

- Codificación de los datos obtenidos
- Registro de la información
- Análisis de contenido

El diseño de la investigación, así como las técnicas y estrategias marcadas (triangulación, sistema mixto de métodos cualitativo-cuantitativo), determinan la forma en que se desarrollarán los trabajos de laboratorio. De esta manera el marco de investigación del estudio se desarrolla planificando dos trabajos diferenciados, el primero correspondiente a las pruebas de concreto en el laboratorio y la segunda a la modelación del modelo de simulación en gabinete. El diseño del marco de investigación se presenta en la Figura 6.7.



Básicamente, la 1ra fase del estudio cuantitativo inicia con el diseño de las diferentes mezclas con y sin fibras de polipropileno, en base a los datos obtenidos del estudio cualitativo y las características de los agregados en la zona de Veracruz.

Una vez elaboradas las mezclas, se fabricarán los especímenes que serán los elementos representativos del comportamiento del concreto en las diferentes pruebas realizadas.

Los criterios de evaluación a los que se someterá cada uno de ellos en el laboratorio, se realizarán de acuerdo a las normas ASTM. Una vez definidos estos criterios, se escogerán las variables asociadas a cada criterio de tal manera que sea fácil su obtención a partir de los datos disponibles y que a través de los resultados obtenidos en el laboratorio, se obtenga un indicador que permita elaborar conclusiones.

Posteriormente, en la 2da fase del estudio cuantitativo, se realizarán los trabajos de gabinete correspondientes a la realización del modelo de simulación por computadora de un pavimento, para obtener el análisis estructural del mismo considerando las características de un concreto con y sin fibras, sometido a la acción de diversos tipos de tráfico.

La elaboración del modelo se sustentará en los fundamentos teóricos de la investigación para el análisis y diseño de pavimentos, presentados en los Capítulos 1, 2 y anexo 1 en relación a los elementos a considerar, las cargas actuantes de la maquinaria y equipos, así como los métodos de diseño y las variables que intervendrán en la modelación de los pavimentos portuarios.

Dentro de la evaluación del comportamiento estructural del pavimento mediante el modelo de simulación elaborado, un elemento a evaluar, es la factibilidad de sustituir la malla electrosoldada por la adición de las fibras PP, teóricamente adecuadas desde la perspectiva de otros países que ya las han empleado, por lo que con esta investigación se intenta adaptar el diseño de acuerdo a los materiales existentes en el puerto de Veracruz, buscando que sean viables desde el punto de vista económico.

De acuerdo a lo que se explico con anterioridad, de forma general, la metodología seguida en esta investigación es la indicada en la Figura 6.2

6.11.1 Planificación del trabajo de laboratorio

La importancia de planificar el trabajo de laboratorio se basa en que el éxito o fracaso de la obtención de datos de la investigación depende de este proceso previo, en donde es conveniente tomar algunas decisiones acerca de los alcances del estudio, los objetivos generales y la distribución de tiempo de cada una de sus etapas.

La planificación de la investigación busca alcanzar los siguientes objetivos:

- Establecer las etapas del trabajo de laboratorio.
- Determinar los procedimientos y elementos de cada etapa.
- Establecer los métodos del control del proceso de obtención de datos.
- Prever el tiempo estimado en el desarrollo del trabajo de laboratorio.

Respecto a la constitución y diferenciación de las etapas, a continuación se determinaron cada una de las fases que constituyen el plan estructural de trabajo en el laboratorio de esta investigación:

1. Fase de planificación inicial del trabajo de laboratorio
2. Fase de exploración del terreno de investigación
3. Fase de obtención y preparación de recursos
4. Fase de acceso al laboratorio
5. Fase de cierre del acceso a laboratorio

1. Fase de planificación inicial del trabajo de laboratorio

La fase de estudio en el laboratorio se inicia con una planificación y periodización de cada una de las tareas a desarrollar en las distintas etapas. Se toman las decisiones sobre los objetivos a alcanzar y la forma de alcanzarlos; asimismo se delimita y acota el proceso en función de los recursos y posibilidades existentes.

2. Fase de exploración del terreno de investigación

Antes de entrar en el terreno de acción, se realiza una pequeña observación del universo de estudio a través de opiniones del director de tesis, y personas relacionadas con el ámbito estructural y técnicos encargados de realizar pruebas de laboratorio, con la finalidad de mantener un cambio de impresiones sobre las pruebas a realizar en el concreto reforzado con fibras PP.

3. Fase de obtención y preparación de recursos

Tal y como se proyecta en el diseño de la investigación, es necesario abastecerse de una serie de recursos humanos, económicos y materiales para desarrollar el trabajo de laboratorio.

En este sentido, con relación a los recursos humanos, se realizaron las gestiones oportunas para configurar un equipo colaborador en el trabajo de laboratorio. Dicho grupo fue constituido por alumnos del 5º semestre de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, de la carrera de Ingeniería Civil, de quienes se buscó apoyo aprovechando su periodo de prácticas en el laboratorio de materiales.

Con relación a los recursos materiales y económicos se realizarán con autofinanciamiento, y mediante el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana para realizar las pruebas en el laboratorio de materiales sin costo alguno por el uso de las instalaciones, para lo cual se tramitaron los permisos correspondientes por medio de la Dirección del Instituto de Ingeniería hacia la Dirección de la Facultad de Ingeniería para solicitar su colaboración y apoyo en la investigación.

4. Fase del acceso al laboratorio

En esta etapa el objetivo se centra en la obtención de datos de las pruebas en forma rigurosa, para lo cual se establecieron las estrategias descritas ampliamente en el apartado 7.9, de este mismo estudio.

5. Fase de cierre del acceso al laboratorio

Es la etapa final destinada a culminar el trabajo de laboratorio, de la forma más satisfactoria posible para todas las partes involucradas en el proceso (elementos de análisis, equipo colaborador, investigador principal y colaboradores externos).

En los cuadros siguientes se representa la distribución en el tiempo de las fases que constituyen el primer trabajo de laboratorio (obtención de datos cualitativos en las pruebas granulométricas) y el segundo trabajo de laboratorio (obtención de datos cuantitativos en las pruebas de concreto).

PERIODO: JULIO DE 2005 A NOVIEMBRE DE 2005

- * Fase de planificación inicial del 1er trabajo de laboratorio: Julio de 2005
- * Fase de obtención y preparación de recursos: Agosto de 2005
- * Fase previa de acceso al laboratorio: Septiembre de 2005

- Trámites de permisos para accesos al laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UV para la realización de pruebas: 3ra semana de octubre de 2005

- Establecer contacto telefónico con la Facultad de Ingeniería: 4ta semana de Octubre de 2005
- * Fase de acceso al laboratorio: Noviembre de 2005

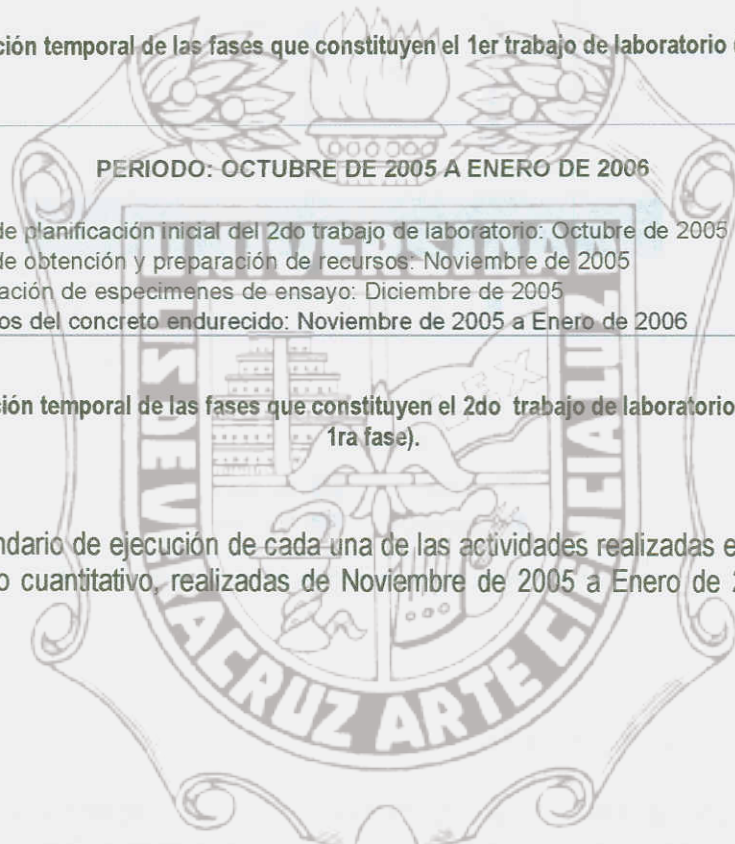
Cuadro 6.1 Distribución temporal de las fases que constituyen el 1er trabajo de laboratorio (Estudio Cualitativo).

PERIODO: OCTUBRE DE 2005 A ENERO DE 2006

- * Fase de planificación inicial del 2do trabajo de laboratorio: Octubre de 2005
- * Fase de obtención y preparación de recursos: Noviembre de 2005
- * Fabricación de especímenes de ensayo: Diciembre de 2005
- * Ensayos del concreto endurecido: Noviembre de 2005 a Enero de 2006

Cuadro 6.2 Distribución temporal de las fases que constituyen el 2do trabajo de laboratorio (Estudio cuantitativo 1ra fase).

Finalmente, el calendario de ejecución de cada una de las actividades realizadas en el laboratorio en la 1ra fase del estudio cuantitativo, realizadas de Noviembre de 2005 a Enero de 2006, se desglosa a continuación.



Noviembre						
D	L	M	M	J	V	S
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Diciembre						
D	L	M	M	J	V	S
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Enero						
D	L	M	M	J	V	S
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				




	Muestra 1		Muestra 3
	Muestra 2		Muestra 4

Tabla 6.8. Calendario de ejecución de ensayos de concreto.

6.11.2 Recursos Humanos y materiales

Se especifica en forma diferenciada los medios humanos y materiales empleados en cada uno de los dos trabajos de laboratorio ya que, a pesar de que en la ejecución general del marco de investigación se presenta una estructura homogénea con relación a las fases de ejecución, existen grandes diferencias en el desarrollo de sus operaciones y procedimientos generando, en consecuencia, necesidades diferentes en cuanto a los recursos humanos y materiales.

Por lo que se expone en primer lugar los recursos humanos empleados en el conjunto de la investigación, detallando posteriormente de forma específica los empleados en cada una de las pruebas de laboratorio.

A. Recursos Humanos

Durante el transcurso de las diferentes fases del trabajo de investigación se contará con los siguientes recursos humanos:

- Un grupo permanente de asesoramiento en las operaciones y procedimientos utilizados en la investigación. Este grupo, como ya se mencionó anteriormente en varias ocasiones, estará constituido por el director de tesis, un estructurista experto y un técnico de laboratorio de concreto.

- Dos estudiantes de 5to semestre de la Facultad de Ingeniería de la UV y una alumna de noveno semestre quien por estar realizando su servicio social en el laboratorio de materiales, apoyará en la ejecución de las pruebas. Además, de que esta alumna cuenta con experiencia en el tema, la cual ha adquirido durante 1 año de trabajar en una planta de concreto en el diseño de mezclas y ensayos de materiales. Este equipo de alumnos colaboradores será fundamental en las tareas realizadas en la investigación.

- Para las labores de introducción en soporte informático, la realizadora de la tesis.

- Para la acreditación institucional de la investigación, el Director del Instituto de Ingeniería, el Dr. Bonifacio Peña Pardo brindó apoyo a través de una solicitud a la Facultad de Ingeniería de la UV para que nos fuera permitido el acceso al laboratorio.

La Dirección de la Facultad de Ingeniería amablemente atendió el requerimiento y nos brindaron el apoyo esperado, sin cobro alguno por el uso de sus instalaciones.

1er Trabajo de laboratorio (estudio cualitativo)		2do Trabajo de laboratorio (estudio cuantitativo 1ra fase)		Trabajo de gabinete (estudio cuantitativo 2da fase)	
Recursos Humanos	Funciones	Recursos Humanos	Funciones	Recursos Humanos	Funciones
3 alumnos	Apoyo en la realización de pruebas	3 alumnos	Apoyo en la realización de pruebas	Investigador principal	Elaboración del modelo de simulación
1 investigador	Realización de pruebas	1 investigador	Realización de pruebas	Director de tesis	Revisión de los conceptos básicos de diseño
1 Laboratorista	Asesoramiento durante la elaboración de las pruebas	1 Laboratorista de pruebas de concreto	Asesoramiento durante la elaboración de las pruebas	Estructurista externo	Asesoramiento para los criterios de diseño

Tabla 6.9. Recursos humanos utilizados en la investigación.

Como el equipo de alumnos colaboradores representa un porcentaje elevado de los recursos humanos empleados en la investigación, se considerará importante determinar el procedimiento llevado a cabo para realizar la formación de dichos alumnos, ya que dicho proceso fue clave para determinar la consolidación del equipo, de tal forma que su capacitación permita calificarlos como recursos humanos.

Formación del equipo colaborador para el primer trabajo de laboratorio (estudio cualitativo)

El técnico experto en pruebas de laboratorio, asumirá la responsabilidad de instruir al equipo colaborador en las tareas y el modo de actuación para la obtención de datos referente a las pruebas granulométricas. El objetivo de esta formación será apoyar los conocimientos que previamente traen los alumnos, ya que al cursar el 5to semestre de ingeniería llevan la materia denominada "Laboratorio de

materiales” donde aprenden todo lo relacionado con las pruebas básicas realizadas en el laboratorio a los agregados, al concreto, entre otros materiales ampliamente usados en la construcción.

Sin embargo, la asesoría por parte del laboratorista, será con la finalidad de que los resultados de la investigación sean fiables y válidos.

Los objetivos planteados para la fase de formación del equipo colaborador de la investigación son los siguientes:

1. Informar a los colaboradores e instruirlos en lo relativo a la temática del trabajo, a los objetivos de la investigación y a los objetivos particulares del trabajo de laboratorio
2. Dar a conocer el contenido del proyecto de la investigación
3. Presentar el proceso del trabajo de laboratorio basado en las normas ASTM para ensayo de materiales

Formación del equipo colaborador para el segundo trabajo de laboratorio (estudio cuantitativo)

El equipo colaborador para las pruebas de concreto será el mismo que el empleado como apoyo en el estudio cualitativo.

Al igual que en la primera parte de la investigación, el técnico de laboratorio y experto en pruebas de concreto, llevará la responsabilidad de instruir al equipo colaborador en las tareas y el modo de actuación para la obtención de datos referente a las pruebas destructivas del concreto.

Formación del equipo colaborador para el trabajo de gabinete (estudio cuantitativo 2da fase)

Esta fase corresponde a la elaboración del modelo de simulación con el software Ram Advance, donde se pretende representar las condiciones reales del comportamiento de un pavimento de concreto reforzado con malla electrosoldada (tradicional) y un pavimento reforzado con fibras de polipropileno, asimismo la investigación se apoya en el director de tesis, en su amplia experiencia, así como un ingeniero estructurista externo quien apoyaría para la realización de los criterios a considerar en la modelación.

B. Recursos Materiales

Para el desarrollo del **primer trabajo de laboratorio**, se requieren los siguientes recursos materiales:

- Material Inventariable:
 - Una PC “Pentium IV” para el tratamiento de los datos y elaboración de la documentación de laboratorio
 - Sistema operativo “Windows XP”, con el paquete Microsoft Office

2da Parte. Planteamiento y desarrollo de la investigación

- Cámara digital, para el registro de las pruebas
- Un saco de arena producto de trituración
- Un saco de grava de la región
- Impresora
- Scanner

- o Material Fungible:
 - Papel para impresiones de los datos obtenidos y el avance de tesis para revisión por parte de expertos
 - Carpetas con la documentación de laboratorio para los colaboradores de la investigación
 - Memory Stick para cámara digital de 16 MG

Para el desarrollo del **segundo trabajo de laboratorio (estudio cuantitativo 1ra fase)**, se han requerido los siguientes recursos materiales:

- o Material Inventariable:
 - Una PC "Pentium IV" para el tratamiento de los datos y elaboración de la documentación de laboratorio.
 - Sistema operativo "Windows XP", con el paquete Microsoft Office
 - Cámara digital para el registro de las pruebas
 - 4 sacos de Cemento Portland tipo CPO 30 RS BRA de 50 kg cada uno
 - 10 Sacos de grava del mismo tipo a la analizada en el primer trabajo de laboratorio
 - 7 sacos de arena producto de trituración
 - Aditivo Sikafiber (fibras PP)
 - Equipo de laboratorio necesario en cada prueba
 - Impresora
 - Scanner

- o Material Fungible:
 - Papel para impresiones de los datos obtenidos y el avance de tesis para revisión por parte de expertos
 - Carpetas con la documentación de campo para los colaboradores de la investigación
 - Soporte magnético para transferir los archivos
 - Memory stick para cámara digital de 16 MG

Para el desarrollo del **trabajo de gabinete (estudio cuantitativo 2da fase)**, se han requerido los siguientes recursos materiales:

- o Material Inventariable:

2da Parte. Planteamiento y desarrollo de la investigación

- Una PC "Pentium IV" para el tratamiento de los datos y elaboración de la documentación de laboratorio.
- Sistema operativo "Windows XP", con el paquete Microsoft Office
- Software para diseño estructural Ram Advanse
- Impresora

- o Material Fungible:
 - Papel para impresiones de los datos obtenidos y el avance de tesis para revisión por parte de expertos
 - Carpetas con la documentación de laboratorio para los colaboradores de la investigación
 - Soporte magnético para transferir los archivos

El financiamiento del material precisado en todas las etapas del estudio, se ha cubierto en su totalidad con medios propios de la autora de la tesis.

6.11.3 Acceso al laboratorio

Después de la planificación de los trabajos de laboratorio, la obtención de los recursos necesarios y el proceso de formación del equipo colaborador, se expone el proceso de acceso al laboratorio para la aplicación de los instrumentos de recolección de datos.

El objetivo prioritario de esta fase se plantea en términos de control y seguimiento en la obtención de datos en la investigación. En este sentido, considerando la aplicación de un sistema metodológico mixto en la obtención de datos (cualitativos – cuantitativos), se detallan por separado las particularidades de acceso al laboratorio del estudio cualitativo y el acceso al laboratorio del estudio cuantitativo:

- o Acceso al laboratorio del estudio cualitativo

El primer acceso al laboratorio quedó delimitado desde la entrada y aplicación de los instrumentos, hasta la recuperación definitiva de la totalidad de ellos.

En el estudio cualitativo el acceso al laboratorio se realizará con la ayuda del equipo colaborador. Se considerará el inicio a partir del ingreso a la Facultad de Ingeniería de la UV (contemplada como procedimiento de formación), en esta se ejecutarán los siguientes procedimientos (ver apartado 6.11.2 Recursos Humanos y materiales):

- Informar el proceso de trabajo en el laboratorio y acordar el sistema a seguir
- Confirmar el registro de las poblaciones de estudio (cantidad de muestra del agragado para cada prueba)
- Acordar la fecha y hora de realización de los ensayos en el laboratorio
- Aclarar cualquier duda o problema

- Establecer un sistema para posibles imprevistos

Mediante los procedimientos descritos, se optimizará la entrada al laboratorio en los siguientes aspectos:

- Previsión de la obtención de la muestra de los agregados pétreos de la región
- Ofrecer rigurosidad en la aplicación de las normas ASTM en los ensayos como reflejo de la seriedad de la investigación

A partir de este momento se pondrá en marcha el sistema procedimental apegándose a los consejos del laboratorista y las normas ASTM para ensayos en laboratorio, quedando éste determinado en tres subfases dentro del acceso al laboratorio:

1. Realización de las pruebas
2. El control y seguimiento de las mismas
3. La recuperación de datos

A continuación se muestran las funciones del investigador principal en cada una de las subfases:

- Coordinación del equipo colaborador y seguimiento del proceso
- Supervisión del acceso al laboratorio
- Resolución de imprevistos sobre el terreno de acción

En cuanto a la tres sub-fases de acceso al laboratorio, cada una se define a continuación:

1ra sub-fase. Realización de las pruebas

La granulometría de los agregados pétreos corresponde al primer ensayo de laboratorio. Asimismo, se busca determinar las características de los agregados de la región, debido a su importancia en el comportamiento de las mezclas de concreto.

2da sub-fase. El control y seguimiento de las mismas

El seguimiento de las pruebas se llevará a cabo mediante la aplicación de las Normas ASTM para granulometrías y ensayos hechos en laboratorio.

En la etapa de fabricación de los especímenes de concreto, se debe tener especial cuidado, en el acabado manual. Este queda por lo general demasiado rugoso para que pueda apoyarse directamente en la máquina de ensayo, ya que es necesario garantizar que la presión quede uniformemente distribuida y que la aplicación de la carga sea paralela al eje del cilindro, por lo tanto es necesario el cabeceo de los mismos para su ensayo en la máquina universal.

El cabeceo consiste en aplicar un material, generalmente azufre en los extremos del cilindro para producir una superficie lisa de apoyo, lo que se realiza de acuerdo a la norma ASTM C 617.

Este es solo un ejemplo de los cuidados que se tienen que llevar en la elaboración de los especímenes de concreto, así como el adecuado seguimiento de las pruebas.

Otro punto importante en el seguimiento son las condiciones de curado, ya que esto influye en forma importante en la resistencia aparente de los especímenes.

En lo referente a los modelos de simulación de losas, se debe cuidar que el modelo satisfaga las condiciones reales de diseño.

Sin embargo, aún cuando las especificaciones de laboratorio se sigan cuidadosamente y el proceso se realice por operadores experimentados, los resultados que se obtengan no serán uniformes, siempre existirá dispersión en los datos, como en cualquier proceso de medición. Estas dispersiones pueden ser inherentes al tipo de ensaye, por errores accidentales o porque no hubo uniformidad en el material ensayado.

Estas condiciones son las que debe evitar en lo posible el investigador, asimismo, cabe destacar que la coordinación y el seguimiento de los ensayos se realizarán conjuntamente con el laboratorista.

3ra subfase. Recuperación de datos

Se llevará a cabo mediante hojas de control facilitadas por el laboratorio de materiales.

- Acceso al laboratorio del estudio cuantitativo (1ra fase)

El segundo trabajo de laboratorio quedará delimitado desde la determinación de las características de los agregados, para el diseño de la mezcla de concreto.

En el estudio cuantitativo, el acceso al laboratorio se iniciará a partir de la elaboración de las mezclas de concreto para fabricar los especímenes de ensayo. Se realizarán ensayos de las siguientes pruebas:

- Compresión en cilindros de concreto
- Vigas sometidas a flexión
- Cilindros para tensión indirecta (prueba brasileña)

- Trabajos de gabinete del estudio cuantitativo (2da fase)

La última fase del estudio cuantitativo está determinada por obtención de las propiedades del concreto reforzado con fibras PP, para el diseño de los elementos placa del pavimento en su modelación.

A partir de esta información se pretende elaborar un modelo de simulación del pavimento mediante el software RAM Advanse.

6.12 Análisis de los datos

En este apartado se dispone presentar los procedimientos generales para efectuar el tratamiento de los datos de la investigación. El proceso abarca el análisis de contenido de los datos cualitativos y el análisis estadístico de los datos cuantitativos.

6.12.1 Procedimiento de análisis de los datos cualitativos

Las transcripciones de los datos obtenidos en las pruebas de granulometría que se realizaron de las muestras de estudio (agregados fino y grueso), representarán los elementos de análisis de contenido del estudio cualitativo.

A pesar de que en un estudio granulométrico las propiedades de los agregados pétreos como son densidad, absorción, humedad, etc están basados en valores numéricos, el enfoque de las pruebas de laboratorio es única y exclusivamente evaluar sus características, ya que no existe una variable independiente que sea manipulada en el estudio.

Por lo que para completar el análisis de los datos se seguirán cuatro fases:

La primera fase consiste en la determinación de los datos a través de su clasificación y tamizado por medio de las mallas en el laboratorio. Para lo cual se localizarán los aspectos más relevantes de contenido de cada uno de los agregados (fino y grueso).

En la segunda fase se codificará la información de acuerdo a tres categorías granulométricas: "gruesa", "fina" o "muy fina". El criterio utilizado se basa en la proximidad o lejanía de los valores de los módulos de finura y las gráficas granulométricas tipo aplicables en cada caso. De esta forma, para cada uno de los parámetros analizados se obtendrá una categoría de respuesta ("mala", "regular" o "buena").

La tercera fase consistirá en la interpretación de los resultados de los dos colectivos estudiados.

La cuarta fase consistirá en realizar una síntesis de los resultados, realizando un informe en el que se refleje la interpretación del análisis de los datos cualitativos.

Fase 1. Determinación de los datos (codificación de la unidad de registro)

Después de realizar el tamizado de los agregados por las mallas y colocar la malla No.4 (la frontera entre agregado grueso y fino), se procederá a la clasificación de las unidades de análisis en categorías apropiadas para describir en forma ordenada el contexto de la investigación.

Fase 2. Codificación de las unidades de registro

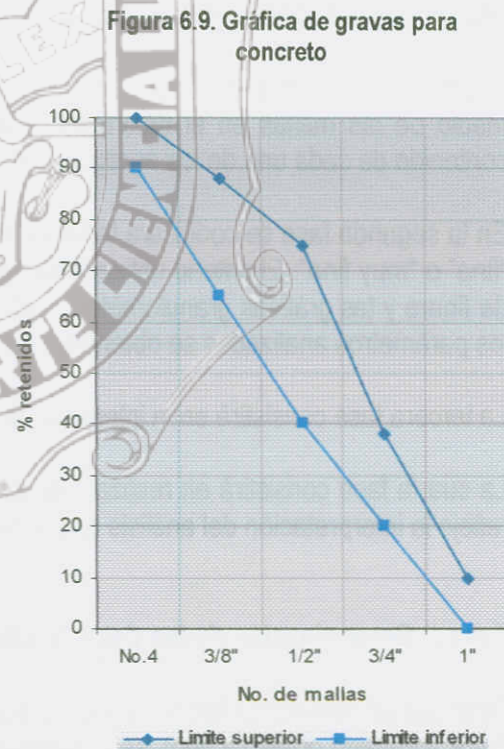
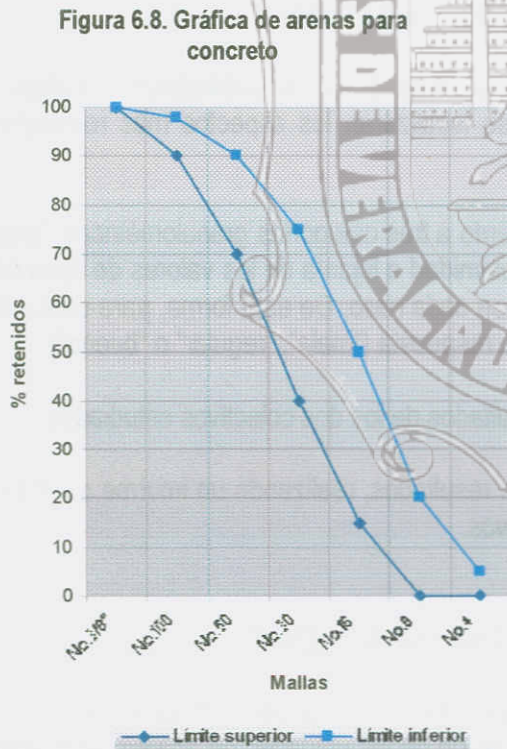
Para la arena de acuerdo a su módulo de finura, se tienen los siguientes valores:

Tipo	MF
Arena gruesa	2.50 - 3.50
Arena fina	1.50 - 2.50
Arena muy fina	0.50 - 1.50

Tabla 6.10. Clasificación de la arena por su módulo de finura.

Como orientación se puede decir que el módulo de finura para gravas oscila entre 6.5 y 7.5, aún cuando se pueden tener variaciones amplias.

La granulometría del agregado fino dentro de los límites de la norma ASTM C 33, generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites de la norma ASTM C 33 con respecto al tamaño de las cribas se indican en las Figuras 6.8 y 6.9.



De acuerdo a la Figura 6.8, un material óptimo es el comprendido entre la curva superior e inferior. La zona inferior izquierda corresponde a materiales muy finos (arenas) y la zona superior derecha corresponde a materiales gruesos (gravas).

La Figura 6.9 corresponde a la gráfica de la granulometría para gravas con TMA de 1", y aplican las mismas condiciones que para la Figura 6.8.

Bajo esta primera revisión y delimitación de los agregados, se tiene como finalidad clasificar el tipo de agregado al que pertenecen las arenas y gravas del puerto de Veracruz según los códigos de identificación mencionados anteriormente.

A través de la tabulación numérica precodificada de los datos obtenidos en el laboratorio, se podrá identificar el tipo de agregado, correspondiente al colectivo que se este midiendo.

Esta fase trata una segunda dimensión de codificación de los datos, dado que se pretende obtener la interpretación global de ambos colectivos de análisis.

La codificación de las unidades de estudio se realizó de acuerdo a los dos colectivos de estudio, que como ya se comentó anteriormente, correspondían a "gruesa", "fina" y "muy fina" de la respuesta con relación al enunciado de los resultados del análisis cualitativo. De esta forma quedarán contestados los resultados de esta parte del estudio, diagnosticando las características de los agregados a través del análisis de tamizado y la determinación de sus propiedades.

Este análisis permitirá contrastar las diferencias significativas detectadas en el análisis del estudio cuantitativo, profundizando en los motivos del comportamiento de las diversas mezclas de concreto.

Fase 3. Interpretación de los datos

Los datos acumulados en cada sección y en cada unidad de contexto, se agruparán de forma que el análisis se centre en la interpretación del recuento de datos acumulados entre las pruebas realizadas a la muestra representativa de la población de estudio.

La integración de los datos, indicará el nivel de significación para un buen diseño del concreto, tanto en la muestra patrón como en las mezclas que contengan fibras PP, para evaluar los resultados del estudio cuantitativo.

Fase 4. Síntesis de los resultados

Con el objetivo de seguir la línea secuencial de las secciones de información, se realizará un resumen del análisis de contenido de los agregados, para su posterior empleo en el diseño de las mezclas de concreto.

A continuación se presenta el formato de presentación de la síntesis de los datos obtenidos:

Característica	Agregado fino	Agregado grueso
PVS		
Densidad		
% de absorción		
TMA		
Módulo de finura		

Tabla 6.11. Formato resumen de las características de los agregados pétreos.

6.12.2 Procedimiento de análisis de los datos cuantitativos (1ra fase)

Los datos que se obtendrán de los ensayos estarán sujetos a variaciones, por lo que para un gran número de información, existen ciertas medidas que indican la uniformidad de los especímenes de ensayo.

Debido a que los valores de resistencia obtenidos cuando se ensayan varios especímenes de una misma mezcla de concreto son variables y se muestra una dispersión cercana a la resistencia media.

La variabilidad en los resultados depende de las variaciones en los materiales de la mezcla, el procedimiento de muestreo, los cambios en la elaboración de la mezcla, la forma de elaboración de los especímenes y las variaciones en los ensayos.

Debido a esta situación, la tipología de análisis empleada en la investigación corresponde a un análisis *estadístico descriptivo*. A partir de la información estadística descriptiva de la investigación, el análisis se basa fundamentalmente en la relación y comparación de medias aritméticas de las variables de investigación.

La medida más común de la tendencia central de un conjunto de datos es el *promedio* por lo que para determinar la resistencia se empleará esta medida.

Así, se realizarán dos niveles de análisis para los dos colectivos estudiados (concreto con y sin fibras). Para los otros dos colectivos (agregado grueso y fino); únicamente se describirá su comportamiento y los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas.

Para el caso de los modelos de simulación, se agruparán los resultados obtenidos a través de la computadora.

Cada uno de estos niveles de análisis seguirá un proceso de dos fases:

- 1ra Fase: Análisis descriptivo de las variables
- 2da Fase: Análisis comparativo y de relación de las variables de la investigación (por categorías)

La toma de decisiones en cuanto a las pruebas estadísticas a realizar tras la recopilación, codificación y depuración de los datos, dependerá de tres factores:

- El grado de exactitud de las variables de la investigación
- La forma en que se han planteado los objetivos de la investigación
- Las motivaciones del investigador

De este modo, se realizará un análisis de la medida de tendencia central (Media {M}), a través de la cual se pretende en primer término, describir los resultados de las respuestas de los especímenes de ensayo, para posteriormente relacionar y comparar sus variables.

Así, a través de procedimientos estadísticos se obtendrán los resultados de resistencias promedios (X).

La resistencia promedio para el conjunto de los especímenes de ensayo elaborados se calculará con la media {M} a través de la fórmula:

$$X = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (6.1)$$

Donde:

X : Resistencia promedio, en kg/cm²

x₁ + x₂ + x₃ + ... x_n : resultados individuales de pruebas de resistencia, en kg/cm²

n: número total de ensayos efectuados

6.12.3 Criterios de análisis

Para cada una de las mezclas de concreto se elaborarán especímenes para tres ensayos a los 7, 14 y 28 días de edad. De éstos se obtendrán los valores de resistencia buscados para su análisis.

Para determinar cuánto se podían alejar los valores de cada uno de los ensayos entre sí, una vez realizado el análisis estadístico, los valores de los ensayos correspondientes a cada mezcla y su respectiva relación del porcentaje de fibras de polipropileno se someterán al siguiente criterio:

- La resistencia a la compresión promedio f_c será el promedio de los ensayos de resistencia consecutivos.
- La resistencia a la tensión indirecta realizada a través de la prueba brasileña, será el promedio de los ensayos de resistencia consecutivos.
- La resistencia promedio a la flexión "Mr" o módulo de ruptura será el promedio de los ensayos de resistencia consecutivos.

6.12.4 Secuencia de análisis

El proceso de reducción de los datos obtenidos a través de la aplicación de las técnicas de recolección de información, se realizará mediante la codificación de los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, la introducción en los formatos en el ordenador y el tratamiento estadístico de los datos.

Codificación de los datos. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos, de acuerdo a los formatos proporcionados por el laboratorio de la Facultad de Ingeniería, se deberán codificar para cada colectivo. Los códigos elaborados se representan en la "Codificación de variables de análisis", de acuerdo a las Tablas 6.12 y 6.13.

1ra fase: Pruebas de la muestra patrón y adición de fibras PP

Dentro de estos colectivos los datos obtenidos de las resistencias de cada espécimen de ensayo se tabularán de acuerdo a la Tabla 6.12.

No. especimen	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro promedio(cm)	Area (cm ²)	Carga máxima (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
1						
2						
3						
4						
5						
.....						
n						

Tabla 6.12.Tabulación de los datos de ensayos de resistencia a la compresión del concreto.

2da fase: Elaboración de los modelos de simulación de losas

Para ambos colectivos (losas con tráfico ligero y tráfico pesado) a través de modelos de simulación se evaluarán los momentos y esfuerzos máximos que soportarán las losas, y finalmente se determinará el tipo de refuerzo más conveniente.

Tratamiento de los datos. Para este proceso en base a las pruebas de laboratorio, se almacenarán y ordenarán los datos y se atenderán las variables de estudio y las categorías de respuesta. La introducción de datos servirá a su vez como proceso de depuración ya que permitirá la detección de las incorrecciones presentes en la investigación.

Una vez que se disponga de los datos depurados de la investigación, habiendo corregido las principales diferencias en los mismos, se tratarán las distintas variables mediante la aplicación de las técnicas estadísticas básicas y las gráficas correspondientes. Estas pruebas permitirán obtener información de interés sobre los resultados del estudio.

6.12.5 Interpretación de resultados

La primera fase de análisis. Se realizará con la finalidad de obtener la información descriptiva de las variables de la investigación, por categorías de cada población de estudio (análisis inter-variable), en el caso de las variables de medición ordinal se utilizarán medidas de tendencia central como la Media $\{ \bar{X} \}$ expresada como la resistencia promedio de los ensayos.

Para describir los resultados de esta primera fase de análisis, se elaborarán cuatro informes de análisis inter-variables (resistencia a la compresión, tensión y flexión, y el control del agrietamiento) en función de la variable independiente (% de fibras PP), en los que se aporta la información descriptiva correspondiente a las respuestas de cada clasificación y categoría de los especímenes de concreto.

La segunda fase de análisis. Se realizará con la finalidad de relacionar y comparar entre sí las variables de estudio y las variables de análisis de cada colectivo por separado (análisis intra-variable) y posteriormente de forma conjunta entre las cuatro variables de estudio (análisis inter-variable), teniendo en cuenta que en este nivel el análisis recaerá exclusivamente sobre las variables de estudio por categorías comunes, tal como se muestra en la Figura 9.1.

6.13 Modelo de evaluación estructural. Trabajo de gabinete

La segunda fase de la investigación cuantitativa, corresponde a los trabajos de gabinete, previo el apoyo de bibliografía, investigaciones realizadas en otros países, apoyo del director de tesis y un experto en ingeniería estructural externo al Instituto de Ingeniería.

6.13.1 Generalidades

La elaboración del modelo matemático para simular las condiciones reales a que será sometido un pavimento ha constituido una de las tareas más complejas y laboriosas de la investigación. Algunas de las características del estudio se mencionan a continuación, las cuales han contribuido notablemente en la complejidad del proceso de diseño del modelo estructural. Se han agrupado en función de dos cuestiones:

En términos generales se observan dificultades serias para modelar analíticamente las estructuras, las cuales suelen ser causa de errores graves en los proyectos. Generalmente esta es la fuente más importante de errores en el proceso de análisis y de verificación, ya que una mala interpretación del funcionamiento conducirá a un modelo inadecuado, el cual puede llevar al colapso a una estructura aparentemente "bien calculada".

La principal causa de esa dificultad es el concepto "específico" que se tiene del análisis y que convierte en receta lo que debiera ser fruto de la interpretación física. Por lo tanto, si se sabe como funciona la estructura se puede encontrar un modelo analítico que resuelva ese funcionamiento. Saber como funciona una estructura es saber como se deforma.

Una cuestión que debe tenerse siempre presente es que con frecuencia no hay un solo modelo que permita describir todos los aspectos del funcionamiento de la estructura. Con frecuencia hay que emplear más de uno y obtener resultados “envolventes” que permitan estimar el funcionamiento probablemente intermedio de la estructura real. Es obvio que las técnicas de modelado varían con los medios auxiliares de cálculo disponibles y que cada vez es posible mayor precisión en la descripción de los fenómenos físicos pero las dificultades señaladas subsisten y existirán siempre.

Es por esto que la finalidad de la investigación es elaborar un modelo de simulación que refleje el comportamiento real de los pavimentos sometidos a cargas portuarias, y cuyo refuerzo sea a base de fibras sintéticas de polipropileno.

1. El tema a estudiar: Desde el punto de vista estructural, la investigación aborda un tema delicado por varios motivos: para dos variables implicadas (los tipos de refuerzos usados en las losas, el tradicional a base de malla electrosoldada y el refuerzo a base de fibras PP).

El tema es crítico a nivel profesional; ya que reproducir en una computadora las condiciones reales a las que está sometido un pavimento portuario no es una tarea sencilla. Esto implica la formulación de preguntas sobre las condiciones del terreno en el cual se apoya el pavimento, su espesor, las cargas, los tipos de juntas, los efectos de temperatura, etc. lo que al mismo tiempo presenta afrontar un compromiso en cuanto a su modelación y el rango de los parámetros a considerar en el diseño estructural del mismo.

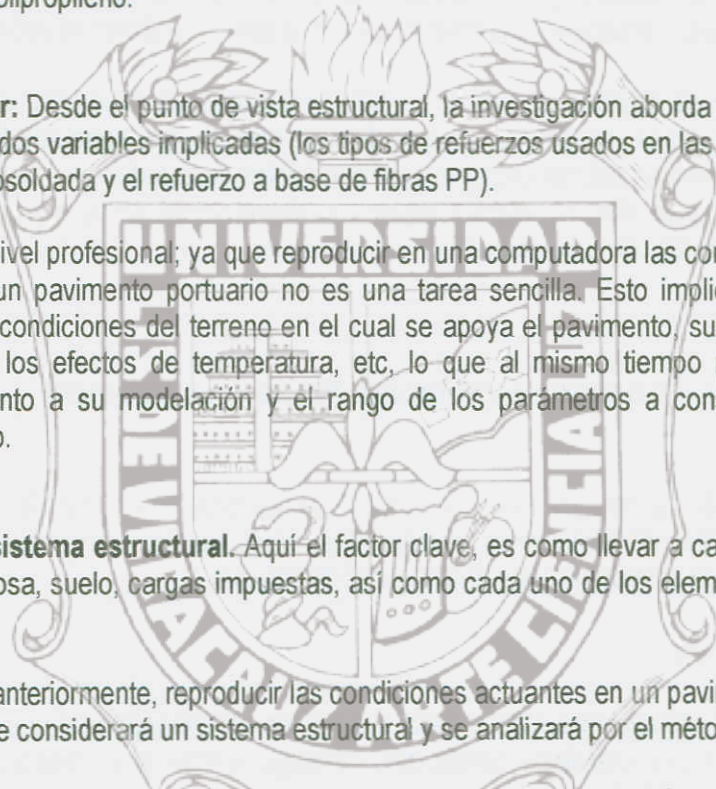
2. Modelación del sistema estructural. Aquí el factor clave, es como llevar a cabo la modelación del sistema estructural losa, suelo, cargas impuestas, así como cada uno de los elementos que integran el sistema.

Como se mencionó anteriormente, reproducir las condiciones actuantes en un pavimento no es fácil, por lo que inicialmente se considerará un sistema estructural y se analizará por el método del PCA.

Independientemente de este análisis, en gabinete se llevará a cabo la tarea de crear un nuevo modelo por medio de un ordenador, el cual pueda proporcionar resultados parecidos al mundialmente avalado método del PCA en pavimentos, hasta calibrar y tener plena seguridad que los resultados obtenidos por medio de la computadora son confiables para representar cualquier modelo de pavimento portuario.

La formulación del problema de cálculo estructural de pavimentos consta de tres aspectos básicos:

- 1) Modelo de la carga superficial
- 2) Modelo de los materiales
- 3) Modelos de respuesta del pavimento



6.13.2 Modelos típicos usados en sistemas estructurales

a) Modelos de carga

La carga aplicada puede ser modelada como, una carga estática, una carga móvil, una carga vibratoria o una carga de impulso. La mayoría de los programas usan en la práctica el modelo de carga estática, ya que modelar cargas móviles o dinámicas es mucho más complejo y requiere mayores esfuerzos de formulación y de cálculo.

En general, puede afirmarse que las cargas móviles producen tensiones menores que las estáticas de igual magnitud, por lo tanto el factor de impacto hasta ahora usado por los pavimentos de concreto, carece de sentido. Sin embargo, conviene tener en cuenta, similarmente a lo establecido para el cálculo un factor de seguridad con respecto a las cargas, por lo que las cargas estáticas son representativas y se mantienen del lado de la seguridad.

b) Modelo de los materiales

En general, los programas usados asumen que los materiales del pavimento son lineales y elásticos. Este supuesto es una aproximación para la mayoría de los materiales del pavimento; ya que en los materiales granulares de base y sub-base la respuesta depende de las tensiones y por lo tanto no tienen respuestas lineales bajo la carga.

El comportamiento de los materiales de la explanada, arenosos o arcillosos también depende de las tensiones y no es lineal. El módulo de reacción "K" de una explanada arenosa se incrementará con la profundidad bajo la acción del peso propio, mientras que una explanada arcillosa se incrementará al aumentar la distancia horizontal de la carga.

Sin embargo, para facilitar el modelo se asumen estas consideraciones las cuales originan ciertas diferencias con el comportamiento real del pavimento, pero su aproximación dependen también en gran medida del resto de las consideraciones de borde, apoyo, cargas, etc. Finalmente los resultados del nuevo modelo estructural se deben comparar con el diseño de pavimentos por el método de PCA.

c) Respuesta del pavimento

Se necesita un modelo de respuesta en los procedimientos de análisis para calcular la deflexión bajo la carga de ensayo. En general, dependiendo del modelo de carga y de los modelos de respuesta de los materiales, el modelo de respuesta del pavimento se puede clasificar en cuatro tipos:

- 1) Análisis lineal estático
- 2) Análisis estático no lineal
- 3) Análisis lineal dinámico y
- 4) Análisis no lineal dinámico.

El análisis lineal estático es sin duda el modelo más ampliamente usado en la práctica, gracias a su simplicidad, fácil interpretación y a la amplia disponibilidad de programas de ordenador de este tipo.

Para esta investigación se utilizará el software RAM Advanse basado en el método de elementos finitos con un análisis lineal. Las cargas simuladas en el sistema se realizan para el caso estático.

6.13.3 Consideraciones básicas en la formulación del modelo

En la modelación del nuevo sistema se han considerado algunos aspectos como son:

- La adaptación de cada variable (tipo de tránsito, refuerzo, etc) a las condiciones naturales a que están sometidos los pavimentos en el puerto de Veracruz, para evitar que se desprendan interpretaciones diferentes a los objetivos buscados.
- Las restricciones de diseño en cuanto a las características de los materiales de la región.

Las directrices generales que determinan el diseño del pavimento, en función de los aspectos expuestos se trató en varias reuniones realizadas con el director de tesis y un tercer miembro de apoyo directo.

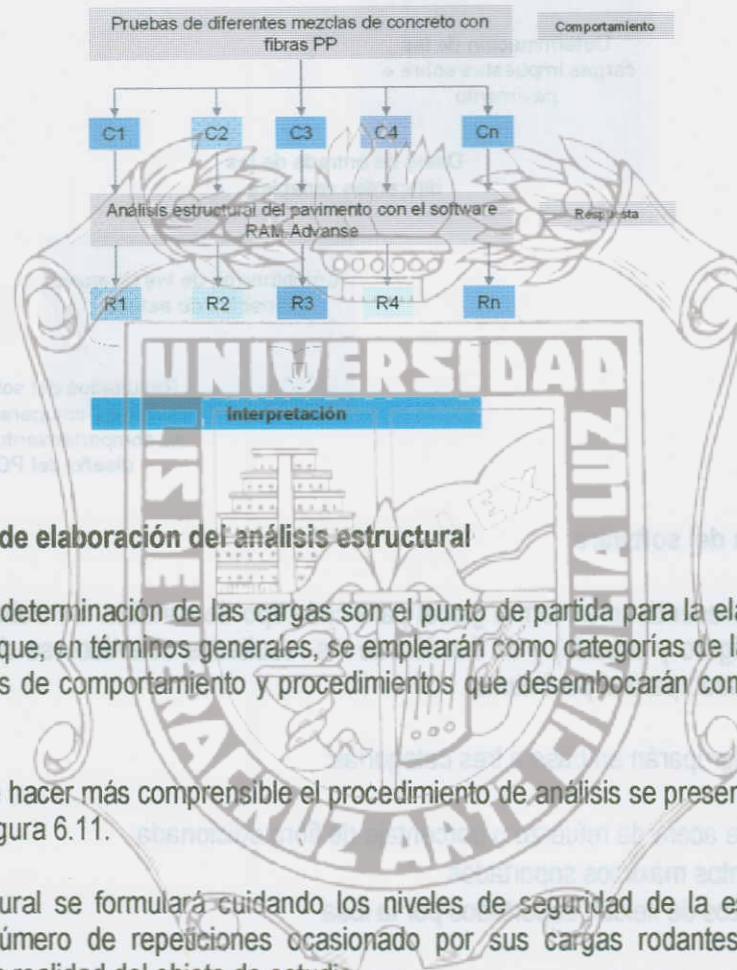
En dichas reuniones se abordaron cuestiones como:

- La composición de un pavimento portuario, y el tipo de bases y sub-bases más comúnmente empleadas en la región
- Las cargas impuestas a los pavimentos en la zona portuaria de Veracruz
- La eficiencia en la transferencia de cargas en las juntas
- Los tipos de juntas a emplear en el pavimento
- El enfoque y la formulación del modelo del sistema en función de las categorías y variables de estudio
- La elección de las diferentes variables que se manejan, ya que por ser un sistema muy complejo, no se incluyen todas las variables, sino únicamente las que se considera que tienen mayor importancia en el comportamiento del sistema
- Las características de los agregados de la región en las mezclas y la incidencia de las fibras de polipropileno en la resistencia
- Correcciones, modificaciones del modelo de análisis en función de los resultados arrojados en las primeras corridas del programa RAM Advanse y la formulación definitiva del sistema en función de los índices de fiabilidad alcanzados

Para la creación del modelo se parte del esquema conceptual y los conceptos básicos de diseño en pavimentación, empleándolos como una orientación inicial con relación a la estructura del mismo y de las variables de estudio.

Se pretende que el modelo refleje un comportamiento previamente establecido de acuerdo a sus condiciones de servicio, tal como se muestra en la Figura 6.10.

Figura 6.10. Esquema de la medida de resultados mediante pruebas de laboratorio.



6.13.4 Secuencia de elaboración del análisis estructural

Las variables y la determinación de las cargas son el punto de partida para la elaboración del análisis del pavimento, ya que, en términos generales, se emplearán como categorías de las cuales surgirán los diferentes aspectos de comportamiento y procedimientos que desembocarán con el diseño estructural del elemento.

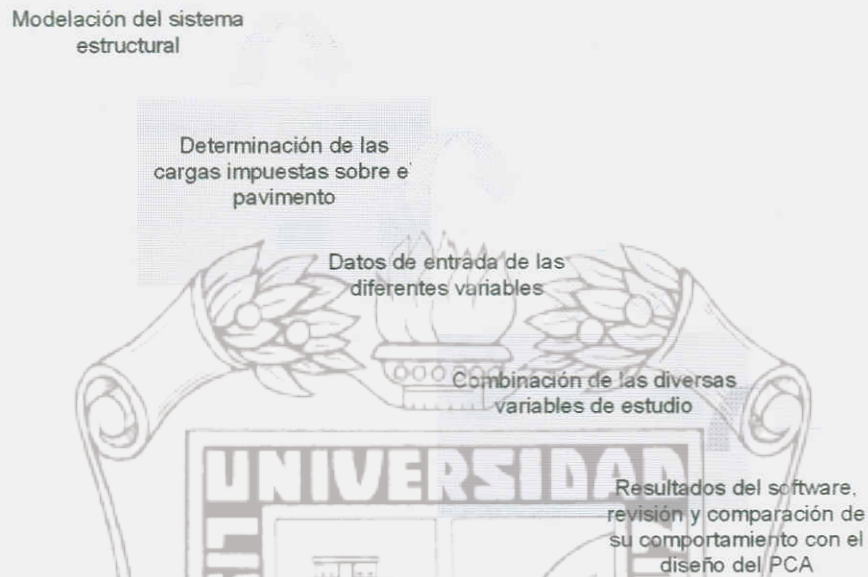
Con la finalidad de hacer más comprensible el procedimiento de análisis se presenta en forma gráfica la secuencia en la Figura 6.11.

El análisis estructural se formulará cuidando los niveles de seguridad de la estructura, sus cargas impuestas y el número de repeticiones ocasionado por sus cargas rodantes, y la capacidad de interpretación de la realidad del objeto de estudio.

El diseño estructural del pavimento comprende todo el proceso de la investigación, incluyendo las pruebas de concreto previamente elaboradas, para analizar los colectivos de estudio correspondientes a la investigación.

El punto de partida del diseño del pavimento es el método del PCA, para posteriormente pasar a la elaboración del modelo. Una vez que dicho modelo se ha ajustado y sus resultados son confiables, se efectuará la revisión para diferentes tipos de tráfico. Los resultados de esta primera fase de validación serán los que determinen si el modelo del sistema es adecuado o se debe realizar algún ajuste, o como alternativa final realizar la propuesta de otro modelo que satisfaga las condiciones reales de la estructura.

Figura 6.11. Secuencia del análisis estructural del pavimento.



6.13.6. Resultados del software

Los resultados se presentarán en forma global para cada tipo de variable. Se trabajará con 3 vehículos de diseño (tráfico ligero y pesado) y en función de los resultados obtenidos se determinará el tipo de refuerzo más adecuado para el pavimento.

Los resultados se agruparán en base a tres categorías:

- Cantidad de acero de refuerzo o porcentaje de fibra adicionada
- Los momentos máximos soportados
- Los esfuerzos de flexión soportados por la losa

Siguiendo la tipología de los formatos, los resultados de estas categorías se agruparán de la siguiente forma:

Modelo	Tipo de refuerzo	Area de acero (cm ²)	Momento máximo (Ton-m)	Esfuerzo máximo fibra (Kg/cm ²)	Esfuerzo máximo concreto (Kg/cm ²)	Esfuerzo máximo acero (Kg/cm ²)	Esfuerzo máximo total (Kg/cm ²)
Losas reforzadas con acero							
1							
2							
3							
Losas reforzadas con fibras PP							
1							
2							
3							

Tabla 6.13. Formato de presentación de resultados del análisis estructural.

De los resultados obtenidos se pretende evaluar el comportamiento de los pavimentos, para posteriormente correlacionar las variables y determinar la factibilidad de uso de las fibras PP en lugar de la malla electrosolada.

La Tabla 6.13 presenta la organización de los resultados obtenidos de los modelos de simulación.

En el anexo 6 se adjunta la corrida del programa con los valores de diseño para cada uno de los modelos de simulación elaborados.

6.13.7. Proceso de revisión del análisis estructural

Es un compromiso obligado de toda investigación cumplir con el procedimiento de revisión con la finalidad de garantizar la credibilidad de los resultados que se obtengan en el estudio.

La primera parte de la revisión del análisis estructural del pavimento se llevará a cabo en dos fases: revisión por un estructurista experto y la calibración de valores por medio de un diseño elaborado con el método del PCA. El objetivo de la revisión del análisis estructural será identificar algún posible error de consideraciones de diseño, aspecto que podría disminuir la validez de los resultados del modelo de simulación.

- Primera fase: Revisión por un estructurista experto

Se requerirá la participación del estructurista con el fin de garantizar un procedimiento homogéneo en la revisión, para lo cual se le proporcionará una copia de la investigación realizada hasta el momento.

-Contenido

- ¿Es necesaria esta consideración de diseño?
- ¿Se requiere afinar más el modelo?
- ¿Se adapta el modelo a los requerimientos portuarios?

-Redacción

- ¿Se podría expresar de un modo más claro? ¿Cómo?
- ¿ Pueden los resultados tener varias interpretaciones?
- ¿Presenta algún prejuicio el análisis?
- ¿La redacción se adapta al nivel de comprensión del sector al que se dirige la investigación?

-Contenido

- ¿Está lo suficientemente delimitada la investigación, en cuanto al lugar?
- ¿Pueden influir los factores ambientales más agresivamente de lo que se han considerado?

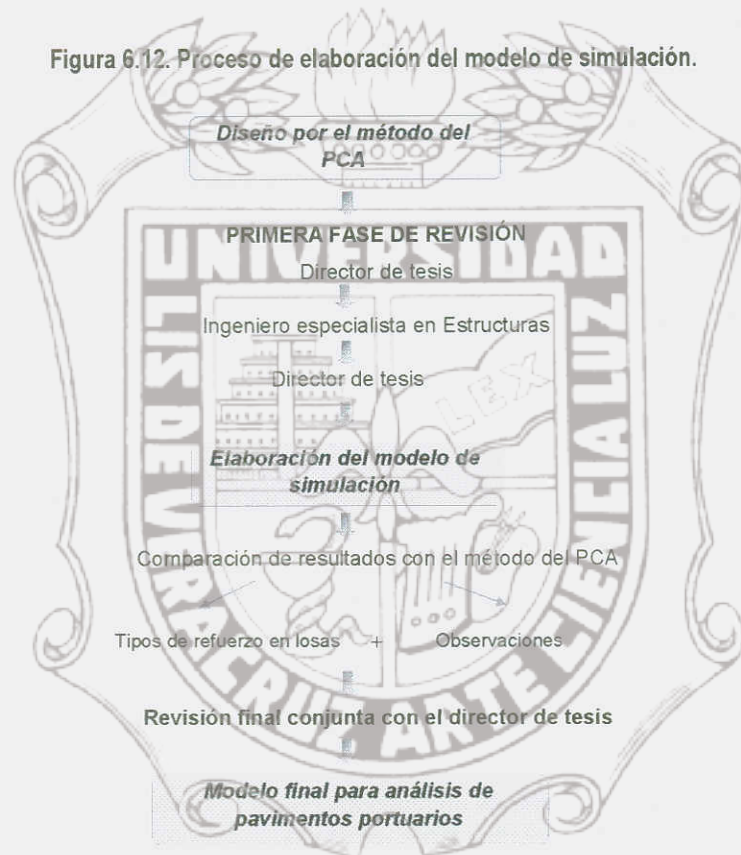
Cuadro 6.3 Aspectos a considerar en la revisión de la investigación.

En esta primera fase de revisión del análisis estructural, supondrá la modificación en función de las correcciones y sugerencias aportadas por el especialista.

- Segunda fase: Calibración del modelo de simulación

La segunda revisión del análisis estructural se efectuará a partir del diseño preliminar de un pavimento mediante el método tradicional del PCA. Los resultados se compararán con el modelo de simulación, con la finalidad de validar el modelo y ajustarlo a la realidad.

Figura 6.12. Proceso de elaboración del modelo de simulación.



El objetivo principal de esta fase es comprobar si los resultados del programa se encuentran dentro de parámetros normales de diseño, así como también realizar una revisión de la redacción y la terminología empleada en función del colectivo estudiado.

Esta información, complementada con los resultados estadísticos adquiridos de los ensayos del concreto en el laboratorio de materiales, servirá para realizar las últimas correcciones y modificaciones.

La revisión final del avance de la investigación se realizará en conjunto con el director de tesis, dando por concluido el proceso de revisión de esta parte de la investigación.

En la Figura 6.12 se presenta un esquema resumen que intenta sintetizar el proceso de revisión de la investigación.



CAPÍTULO 7. PRIMER ENSAYO DE LABORATORIO. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN EL PUERTO DE VERACRUZ

En este capítulo se describen los materiales empleados como materia prima en el desarrollo experimental de la investigación, los equipos utilizados y sus características técnicas, para posteriormente describir los procedimientos operatorios que han sido definidos y empleados en el desarrollo de la tesis.

7.1 Características del cemento

La clasificación de los tipos de cemento está proporcionada por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCE-1999 y la ASTM C 150. De acuerdo a su composición, los cementos Portland se clasifican como:

a) Tipo CPO (Cemento Portland ordinario)

El producido mediante la molienda de clinker Portland y sulfato de calcio. Cuando el proyecto no establezca el tipo de cemento Portland por usar en cada caso, se entiende que se trata de CPO.

b) Tipo CPP (Cemento Portland puzolánico)

El que resulta de la molienda conjunta del clinker Portland, puzolanas y sulfatos.

c) Tipo CPEG (Cemento Portland con escoria granulada de alto horno)

El producido mediante la molienda conjunta del clinker Portland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

d) Tipo CPC (Cemento Portland compuesto)

El que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Portland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Portland con el sulfato de calcio.

e) Tipo CPS (Cemento Portland con humo de sílice)

El producido mediante la molienda conjunta del clinker Portland, puzolanas, humo de sílice y sulfato de calcio.

f) Tipo CEG (Cemento con escoria granulada de alto horno)

El que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Portland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Portland con el sulfato de calcio.

Como la investigación está enfocada a zonas portuarias donde los efectos del salitre y los sulfatos son elevados el cemento a emplear es el fabricado por Holcim APASCO S.A. y su denominación comercial es cemento CPO 30 RS BRA, que corresponde a un cemento tipo Pórtland ordinario resistente a los sulfatos el cual es recomendado para la construcción de obras marítimas.

Cabe señalar que este cemento, cumple con todas las especificaciones establecidas por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 referente a cementos²⁶, por lo cual ha recibido certificación de calidad ONNCCE.

7.2 Características de las fibras PP

La fibra de polipropileno utilizada, es un monofilamento resultante de la dispersión de haces de fibra al entrar en contacto con la humedad del concreto, su nombre comercial es Sikafiber, y es fabricado por el grupo SIKA.

Las fibras de polipropileno fueron adquiridas en la sucursal Sika de la ciudad de Veracruz, Veracruz. Esta empresa las comercializa en México y en el extranjero principalmente como materia prima. Son fibras de color blanco, cuyo envase son bolsas de polietileno de 600 gramos y no afectan o interfieren en lo absoluto con aditivos químicos.

La longitud del filamento es de 19 mm. La Tabla 7.1 muestra un resumen con las características físicas y mecánicas más importantes.

Fibras de polipropileno	
Densidad	48.5 Kg/m ³
Longitud de la fibra	3/4" (19mm)
Color	Blanco

Tabla 7.1. Propiedades de las fibras de polipropileno²⁷.

7.3 Agua

La importancia de estudiar el agua en el cemento radica en que se pueden presentar impurezas, como azúcar, ácidos, materia vegetal y aceites que retardan la hidratación.

La norma oficial NMX C 122 establece las cantidades de impurezas máximas que son tolerables en el agua de mezclado en la elaboración del concreto.

En general, el agua potable es adecuada para la elaboración del concreto; sin embargo, algunas aguas no aptas para el consumo humano se usan para elaborar concreto.

En la investigación, para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó agua potable tomada directamente de la red de suministro de la ciudad de Veracruz.

7.4 Características de la arena

Para elaborar una mezcla de concreto adecuada es necesario determinar las características físicas de los agregados que la componen, las cuales se obtienen a partir de pruebas de laboratorio.

Cabe destacar que en el puerto de Veracruz, la mayoría de las casas materialistas surten una arena muy fina cuyos valores del módulo de finura anda entre 1.60 y 1.85, sin embargo, para fines de este estudio se consiguió arena producto de trituración, la cual por ser más gruesa y contar con una mejor granulometría, se apega a las normas para la elaboración del concreto.

Antes de iniciar cualquier prueba de los agregados grueso y fino, es importante mencionar que la malla No.4 (4.75 mm) es la frontera entre ambos materiales. Así, todo aquel material que se queda detenido en la malla No.4 se considera "agregado grueso o grava" y todo aquel material que pasa por la malla No.4 se considera "agregado fino o arena".

El material para la fabricación de los especímenes de laboratorio se llevó en sacos de rafia y se extendió para secado al sol, posteriormente se cernió por la malla No.4. El material que pasó por esta malla se almacenó en bolsas limpias y de ahí se obtuvo la muestra para las pruebas siguientes.

Cada una de estas pruebas se realizó de acuerdo a normas preestablecidas por la ASTM, descritas en el apartado .3 inciso B.4.

7.4.1 Peso volumétrico suelto

El peso volumétrico es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en kilogramos por metro cúbico.

Existen dos valores para esta relación, dependiendo del sistema de acomodamiento que se le haya dado al material inmediatamente antes de la prueba.

El peso volumétrico suelto: Se usa invariablemente para la conversión de peso a volumen; es decir, para conocer el consumo de agregados por metro cúbico de concreto.

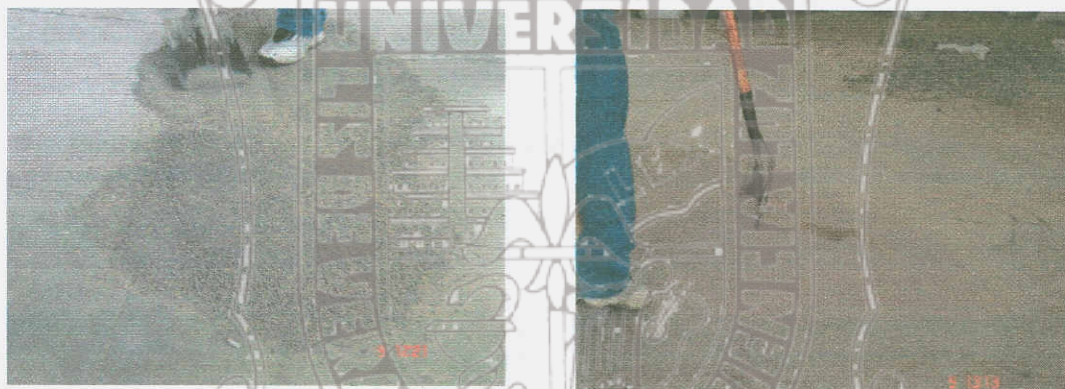
El ensayo se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C 29.

7.4.1.1 Equipo

- Báscula
- Cucharón de lámina
- Pala
- Recipiente con volumen conocido
- Rasero
- Charola

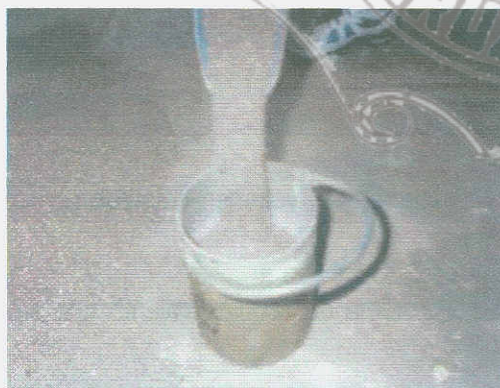
7.4.1.2 Procedimiento

- 1) Para la realización de esta prueba previamente se dejó secar la arena al sol y se cuarteó
- 2) Se pesó el recipiente vacío

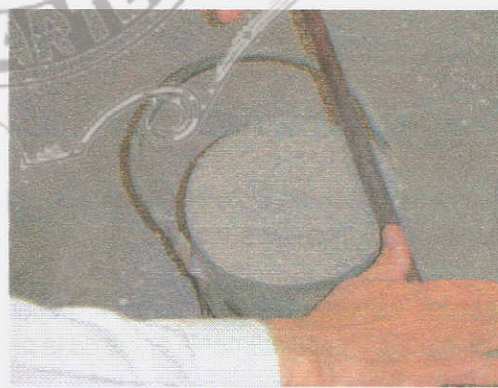


a. Mezclado de la arena

b. Cuarteo



c. Vaciado en tara



d. Enrasado

Imagen 7.1. Determinación del PVSS en la arena.

- 3) Se cuarteó la muestra de arena previamente cernida por la malla No.4
- 4) Con ayuda del cucharón se tomó una porción de material de cada uno de los cuartos para que fuera representativo de toda la muestra. El material se dejó caer dentro del recipiente desde

una altura de 5 cms, hasta que este estuvo lleno y formó un cono natural. Dicha acción se realizó con cuidado, evitando que el material se reacomodara por movimientos indebidos. La medida no se movió durante la operación

- 5) A continuación se recorrió el rasero sobre los bordes de la medida, tantas veces como fue necesario para obtener una superficie plana, procurando no originar movimientos o vibraciones durante la operación
- 6) Se pesó la medida con su contenido de arena, y se anotó el peso obtenido

7.4.1.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior de la prueba, se obtuvieron los siguientes datos:

$$\begin{aligned} W_{\text{tara + arena}} &= 7174 \text{ grs} \\ W_{\text{tara}} &= 2650 \text{ grs} \\ W_{\text{arena}} &= 4524 \text{ grs} \\ \text{Vol. Tara} &= 2.92 \text{ lts} \end{aligned}$$

Con estos datos se calculó el peso volumétrico suelto de la arena con la siguiente fórmula:

$$PVSS = \frac{P - p}{V} \times 1000 \quad (7.1)$$

Donde:

PVSS = Peso volumétrico seco suelto en Kg/m³
 P = Peso propio de la tara más el peso del material en Kg
 p = Peso propio de la medida en Kg
 V = Volumen medido del material en lts

El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal, varía desde aproximadamente 1,200 kg/m³ a 1,760 kg/m³. A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

Peso volumetrico suelto =	1,549	Kg/m ³
---------------------------	-------	-------------------

7.4.2 Análisis granulométrico y módulo de finura

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por el análisis de tamices (Norma ASTM C 136).

La granulometría de los agregados finos depende del tipo de trabajo, por ejemplo, para el diseño de una mezcla de concreto, en general si la relación agua – cemento se mantienen constantes y la relación agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede tener un amplio rango de granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia.

Otro parámetro importante en el diseño de un concreto es el módulo de finura, el cual es un índice de la finura del agregado, ya que entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías pueden tener igual módulo de finura. Este dato es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

La prueba se llevó a cabo los días 9 y 10 de noviembre de 2005 en las instalaciones del Laboratorio de Materiales, facilitadas por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

7.4.2.1 Equipo

- Báscula
- Balanza de torsión con capacidad de 1 Kg y 0.1 gramos de sensibilidad
- Juego de mallas números 4 (4.69 mm), 8 (2.38 mm), 16 (1.19 mm), 30 (0.59 mm), 50 (0.297 mm), 100 (0.149 mm), 200 (0.075 mm) fondo y tapa (clasificación estándar)
- Juego de charolas de lámina galvanizada
- Brochuelo de cerdas y cepillo de alambre

7.4.2.2 Procedimiento

- 1) Del material recuperado de la tara, se pesaron 500 gramos, en una báscula con aproximación al 0.1 gramos
- 2) Vertida la muestra sobre la malla superior (#4) la operación de cribado se realizó soportando a la serie de mallas sobre los dedos e inclinándola de un costado a otro, a la vez que se golpeaban sus costados de un lado a otro con las manos



a. Pesaje de la muestra



b. Cernido de la muestra

Imagen 7.2. Cernido de la arena.

- 3) Una vez que se comprobó que a través de cada malla paso a todo el material menor que su abertura, para lo cual se observó previamente que durante un minuto no pasara más que el 1% del retenido, las porciones se separaron para después pesarlos
- 4) Las mallas deben quedar siempre limpias después de vaciar su contenido y para esto se utilizó el cepillo de alambre o brochuelo, según la abertura entre hilos
- 5) Se pesaron cada una de las porciones obtenidas en el cribado en una báscula de aproximación de 0.1 gramos, en el orden de tamaños correspondiente, haciendo registro de los datos en la Tabla 7.1

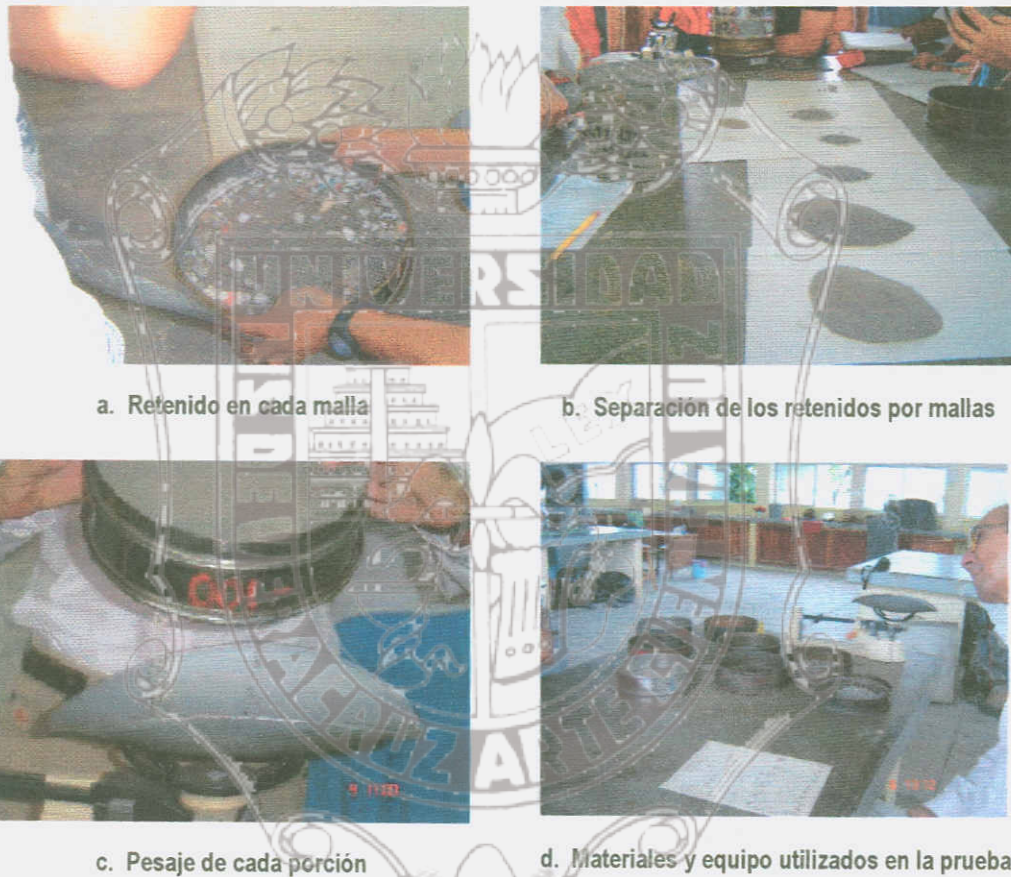


Imagen 7.3. Granulometria de la arena.

7.4.2.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior de la prueba, se obtuvieron los siguientes datos:

No de malla	Peso retenido en gramos	% total	% enteros	% enteros acumulados
4	8.2	1.7	2	2
8	106.1	21.6	22	23
16	94.3	19.2	19	43
30	67.8	13.8	14	56
50	61.8	12.6	13	69
100	92.2	18.8	19	88
200	41.4	8.4	8	96
Charola	18.8	3.8	4	100
Sumas	490.6	100	100	

Tabla 7.2. Análisis granulométrico de la arena.

Con estos datos se calculó el módulo de finura de la arena con la siguiente fórmula:

$$M.F = \frac{\sum_{mallas(N^{\circ} 4 - N^{\circ} 100)} \%}{100} \quad (7.2)$$

Donde:

M.F = Módulo de finura de la arena

$\sum_{mallas(N^{\circ} 4 - N^{\circ} 100)} \% =$ Suma de los % acumulados de la malla 4 a la malla 100.

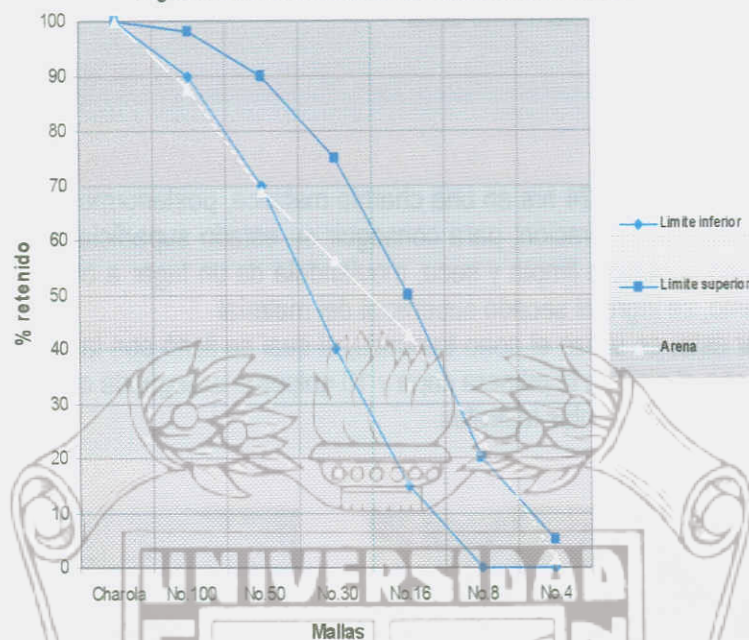
A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

$$M.F = 2.80$$

Por lo tanto de acuerdo a la Tabla 6.10, la arena usada en el ensayo experimental del concreto puede clasificarse como una arena gruesa.

Los datos obtenidos anteriormente se colocaron en las gráficas estándar de granulometrías para arenas, los resultados son los que se muestran en la Figura 7.1.

Figura 7.1. Granulometría de la arena analizada.



Como puede observarse, la curva de la arena se sale ligeramente de los límites establecidos por las normas, sin embargo, para fines de diseño de concreto se considera que es un material adecuado.

7.4.3 Densidad

La densidad relativa es la relación entre el peso de un volumen dado de material saturado superficialmente seco y el peso del mismo volumen de agua destilada a 4°C de temperatura.

Este parámetro es necesario para el diseño de concreto. El ensayo se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C-128.

7.4.3.1 Equipo



Imagen 7.4. Equipo en prueba de densidad.

- Balanza de torsión de 1 Kg de capacidad de 0.1 gramos de sensibilidad
- Frasco de "Chaptman" con capacidad de 500 ml
- Brochuelo de cerdas
- Cono truncado
- Pisón
- Embudo
- Estufa
- Franela o papel absorbente
- Charola de aluminio
- Espátula

- Cristal de reloj
- Arena saturada y superficialmente seca

7.4.3.2 Procedimiento

- 1) Se saturó la arena por 24 hrs en una charola metálica, posteriormente se le retiró el agua y se logró el estado de saturación; para conseguir su estado superficialmente seco se extendió la arena en una superficie limpia y seca, moviéndola de un lugar a otro, para que por efecto del sol y el viento, se logre el secado superficial del material
- 2) Para lograr esto, se utilizó el cono truncado, el cual se llenó con la arena en 2 capas, dándole 15 golpes con el pisón a la primera capa y 10 golpes a la segunda capa, se enrasó y se retiró el cono sin hacer movimientos laterales



a. Determinación de la humedad óptima

b. Pesaje de la muestra



c. Medición del frasco de Chaptman



d. Vaciado del material al frasco de Chaptman

Imagen 7.5. Prueba de densidad en la arena.

Si al quitar el molde, la arena moldeada muestra una superficie plana en su base superior, se debe repetir el paso 2), hasta que al quitar el molde, forme la arena un cono, lo que indica que se encuentra superficialmente seca. En la elaboración de esta prueba, el procedimiento se repitió 2 veces, hasta que se encontró la humedad óptima del material.

- 3) Se calibró el frasco de "Chaptman" a 200 ml
- 4) Se secó el interior del cuello del frasco
- 5) Una vez que se consiguió el estado superficialmente seco de la arena, se pesaron dos muestras, una de 100 grs para la prueba de absorción y otra de 500 grs del material superficialmente seco, pues en ese estado se considera que el material no absorbe agua. La muestra de 100 grs se sometió al secado total, ya sea en la estufa o en el horno, para obtener el peso seco de arena
- 6) Se vaciaron en el frasco de "Chaptman" los 500 gramos de la muestra, empleando para esto un embudo y en la parte de abajo se colocó un folder, por si se daba el caso que se llegara a caer material, este pudiera ser recogido posteriormente y vaciado al frasco
- 7) Se tomó el frasco de "Chaptman" de forma inclinada y se agitó mediante giros para expulsar totalmente el aire arrastrado por el material
- 8) Ya en posición vertical se realizó la lectura al nivel del menisco inferior, la cual fue de 410 ml. Como previamente estaba calibrado a 200 ml, el volumen desalojado de la muestra es de 201 ml

7.4.3.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior de la prueba, se obtuvieron los siguientes datos:

$W_{\text{arena húmeda}}$	=	500	grs
$Vol. \text{ chapman}$	=	201	ml
W_{agua}	=	201	grs

Con estos datos se calculó la densidad de la arena con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{W_{\text{material}}}{W_{\text{agua}}} \quad (7.3)$$

Donde:

ρ = Densidad

W_{material} = Peso del material superficialmente seco en grs

W_{agua} = Peso del volumen de agua desplazado en grs

A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

$$\rho = 2.49$$

7.4.4 Absorción

La absorción se define como la cantidad de agua retenida por un material, después de estar sumergido en ella durante 24 horas y se expresa como un porcentaje del peso seco del material.

Esta prueba se realizó por la necesidad de conocer la humedad del agregado fino, para hacer ajustes en el agua de la mezcla del concreto con la finalidad de que ésta permanezca inalterable.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C-566.

7.4.4.1 Equipo

Para la determinación de esta prueba se emplearon los siguientes aparatos:

- 1 balanza sensitiva al 0.1 de gramos o menos, con una capacidad de 1 a 2 Kg
- Una pequeña cuchara de albañil
- Estufa o parrilla



Imagen 7.6. Secado de la muestra.

7.4.4.2 Procedimiento

- 1) La muestra de 10 grs del material que se puso a secar en la prueba anterior, se revisó con el cristal de reloj para comprobar que la arena ya había perdido toda el agua
- 2) Cuando al pasar el cristal ya no se vaporizaba, en ese momento se logró el secado total del material
- 3) El peso del material se realizó estando este totalmente frío
- 4) El peso del material seco se anotó

7.4.4.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior, se obtuvieron los siguientes datos:

$W_{\text{arena húmeda}}$	=	100	grs
$W_{\text{arena seca}}$	=	92.6	grs
W_{agua}	=	7.4	grs

Con estos datos se calculó el porcentaje de absorción de la arena con la siguiente fórmula:

$$w(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \quad (7.4)$$

Donde:

$W(\%)$ = Porcentaje de humedad
 W_h = Peso de la muestra saturada
 W_s = Peso de la muestra seca

A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

$$w(\%) = 8.0\%$$

7.5 Características de la grava

Para efectos de construcción, la grava o agregado grueso es todo material pétreo que queda retenido en la malla No. 4 hasta la de 6 pulgadas.

Aún cuando la grava no interviene en la misma proporción que la arena en el diseño de una mezcla de concreto, es un factor importante por ser la parte que aporta la mayor resistencia.

Para la realizar un adecuado diseño de concreto con fibras PP, ha sido necesario evaluar las propiedades físicas de los agregados. Cabe destacar que las pruebas realizadas en laboratorio han estado sometidas a las especificaciones de la ASTM para agregado grueso.

7.5.1 Normas ASTM para pruebas de laboratorio en agregados gruesos

Tanto la grava como la arena deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-33, descritas en el apartado 5.3 inciso B.4.

Para trabajar con el material, como la grava estaba contaminada con polvo y agentes extraños se sometió a un proceso de lavado para quitarle las impurezas, tal como se muestra en las siguientes imágenes.

Posteriormente, como el material estaba húmedo no se pudo trabajar con el directamente, por lo que se extendió y se dejó expuesto en el laboratorio para que se seque por 3 días.



a. Lavado

b. Extendido

Imagen 7.7: Proceso de lavado de la grava.

7.5.2 Peso volumétrico varillado

El peso volumétrico varillado: Se usa para el conocimiento de volúmenes de materiales apilados y que están sujetos a asentamientos provocado por el tránsito sobre ellos.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C 29 M, el día 18 de noviembre de 2005.

Una vez seco el material, se homogenizó y se procedió a la obtención del peso volumétrico varillado.

7.5.2.1 Equipo

- Báscula de 125 Kg de capacidad
- Cucharón
- Pala
- Medidas de volumen con su peso propio conocido
- Rasero
- Charola
- Varilla de 16 mm. (5/8") con una punta de casquete esférico y 60 cm. de longitud

7.5.2.2 Procedimiento

- 1) Se llena la medida con tres capas, golpeando la grava con la varilla, dando 25 golpes por cada capa, teniendo cuidado de no hacer penetrar la varilla más que el espesor de la capa que se trabaja, y de no fracturar la grava
- 2) El enrase se hizo con el rasero, corriéndolos sobre los bordes de la medida, y sacando todo el material que se oponga a su libre movimiento por ser grava de diámetro pequeño. Si la grava hubiera tenido un mayor diámetro, el enrase se habría hecho a mano, tratando que el material no sobresaliera de los bordes de la medida
- 3) Los espacios vacíos dejados en la operación de enrase, se llenaron acomodando grava en ellos, manualmente, pero sin ejercer ninguna presión
- 4) Finalmente se pesó la tara con todo y el material



a. Llenado de la tara

b. Pesaje del material

Imagen 7.8. Determinación del PVSV de la grava.

7.5.2.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior de la prueba, se obtuvieron los siguientes datos:

$W_{\text{tara + grava}}$	=	18,256	grs
W_{tara}	=	5,330	grs
W_{grava}	=	12,926	grs
Vol. Tara	=	9.74	lts

Con estos datos se calculó el peso volumétrico varillado de la grava con la siguiente fórmula:

$$PVSV = \frac{P - P}{V} \times 1000 \quad (7.5)$$

Donde:

PVSV= Peso volumétrico seco varillado en Kg/m^3
 P = Peso propio de la tara más el peso del material en Kg
 p = Peso propio de la medida en Kg
 V = Volumen medido del material en lts

A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

Peso volumétrico
 varillado = 1,327 Kg/m^3

7.5.3 Análisis granulométrico

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por el análisis de tamices (Norma ASTM C 136).

Aun cuando la grava no interviene en la misma proporción que la arena, en lo referente a la manejabilidad del concreto, se deben de tener los parámetros para lograr un diseño adecuado de la mezcla.

La realización de esta prueba se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Materiales, facilitadas por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana el día 18 de noviembre de 2005.

7.5.3.1 Equipo

- Báscula de 125 Kg de capacidad
- Balanza de torsión con capacidad de 1 Kg y 0.1 gramos de sensibilidad
- Juego de mallas de $1\frac{1}{2}$ " (38.1 mm) de diámetro, 1" (25.4 mm), $\frac{3}{4}$ " (19.1 mm), $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm), $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm), Número 4 (4.69 mm), y fondo y tapa (clasificación estándar)
- Brochuelo de cerdas y cepillo de alambre

7.5.3.2 Procedimiento

- 1) Se tomó la muestra de la tara con la que se obtuvo el peso volumétrico seco varillado, la cual tiene un peso de 12,926 grs, obtenida por cuarteo. La muestra se paso por las mallas especificadas para el cernido, separando en charolas los retenidos correspondientes. Se tuvo cuidado de que no quedaran partículas aprisionadas en los alambres que forman las mallas
- 2) Una vez separado el material se procedió pesar cada porción de las charolas. Los pesos obtenidos se registraron de acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 8.3.



a. Cuarteo



b. Cernido



c. Retenido por malla



d. Pesaje de los retenidos de cada malla

Imagen 7.9. Granulometría de la grava.

7.5.3.3 Datos y resultados de la prueba

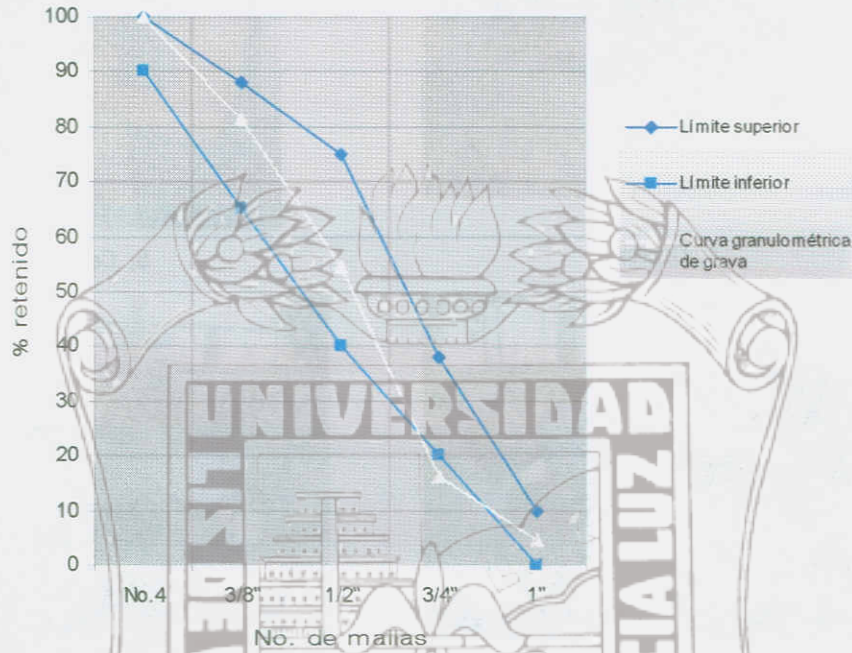
Mediante el procedimiento anterior, se obtuvieron los siguientes datos:

No de malla	Peso retenido en Kilogramos	% total	% enteros	% enteros acumulados
3"	0	0.00	0	0
1 1/2"	0	0.00	0	0
1"	0.576	4.46	4	4
3/4"	1.530	11.84	12	16
1/2"	4.942	38.23	38	55
3/8"	3.455	26.73	27	81
No. 4	1.921	14.86	15	96
Charola	0.502	3.88	4	100
Sumas	12.926	100.00	100	

Tabla 7.3. Análisis granulométrico de la grava.

A partir de estos datos se obtuvo la curva granulométrica del agregado grueso con la curva para agregado máximo de 1", tal como se muestra en la Figura 7.2.

Figura 7.2. Granulometría de la grava analizada.



Esta granulometría es adecuada para efectos de pavimentación, ya que el tamaño máximo del agregado grueso no debe de ser mayor de 1/3 el espesor de la losa de concreto.

Con los datos anteriores, se calculó el módulo de finura de la grava con la siguiente fórmula:

$$M.F = \frac{\sum \text{mallas}(N^{\circ} 3'' + 1/2'' + 3/4'' + 3/8'' + N^{\circ} 4)}{100} + 5 \quad (7.6)$$

Donde:

M.F = Módulo de finura de la grava

$\sum \text{mallas}(N^{\circ} 3'' - N^{\circ} 4)$ = Suma de los % acumulados de la malla de 3" a la malla No.4

A partir de la fórmula anterior, los resultados de la prueba de laboratorio son:

M.F =	6.94
-------	------

7.5.4 Absorción

La absorción es la cantidad de agua retenida por un material después de estar sumergido en ella durante 24 horas. Se expresa como un porcentaje del peso seco del material.

Esta prueba se realizó en para conocer la humedad del agregado grueso, y hacer ajustes en el agua de la mezcla del concreto con la finalidad de que esta permanezca inalterable.

El ensayo fue realizado en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C-566, el 18 de noviembre de 2005.

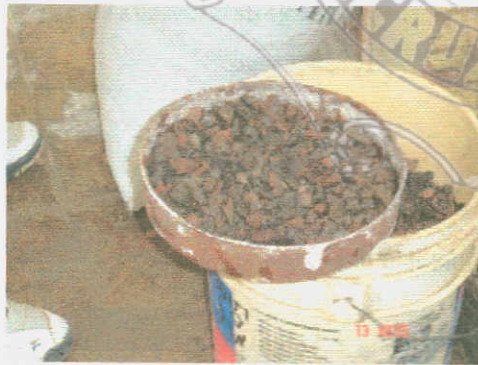
7.5.4.1 Equipo

Para la determinación de esta prueba se emplearon los siguientes aparatos:

- Balanza de torsión de 1 kg. De capacidad y de 0.1 gramos de sensibilidad
- Estufa o parrilla
- Una charola de lámina galvanizada
- Franela o toallas de papel

7.5.4.2 Procedimiento

- 1) Se lavó perfectamente la grava y se dejó saturar en una charola por 24 hrs



a. Lavado de la muestras de grava



b. Saturación de la grava

Imagen 7.10. Proceso de lavado y saturación del agregado grueso.

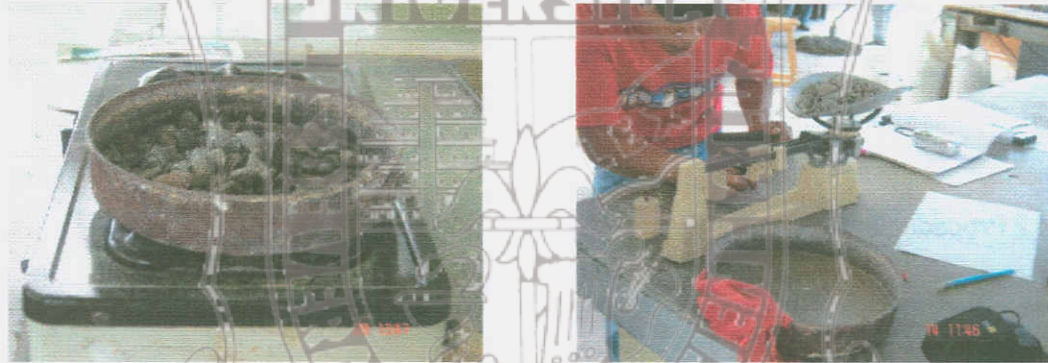
- 2) Se tomó la muestra que se dejó sumergida 24 horas en agua, y se secó superficialmente, con la franela o con unas toallas de papel
- 3) Se pesó exactamente 1 Kg y se anotó este peso

- 4) Se secó en la estufa o parrilla, tantas veces como fue necesario hasta obtener un peso constante. Las pesadas se hicieron estando el material frío.
- 5) Se pesó el material seco y se anotó el valor obtenido



a. Estado de humedad óptima

b. Peso de 1 Kg de la muestra húmeda



c. Secado de la muestra en estufa

d. Pesaje de la muestra seca

Imagen 7.11. Prueba de absorción del agregado grueso.

7.5.4.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento anterior, se obtuvieron los siguientes datos:

$W_{\text{grava húmeda}}$	=	1000	grs
$W_{\text{grava seca}}$	=	964.8	grs
W_{agua}	=	3,520	grs

Con estos datos se calculó el porcentaje de absorción de la grava con la fórmula (7.4), la cual también se empleó para determinar el porcentaje de absorción de la arena.

$w (\%) =$	3.65
------------	-------------

7.5.5 Densidad

La densidad relativa es la relación entre el peso de un volumen dado de material saturado y superficialmente seco y el peso del mismo volumen de agua destilada a 4°C de temperatura. Este parámetro se requiere para el diseño adecuado de concreto.

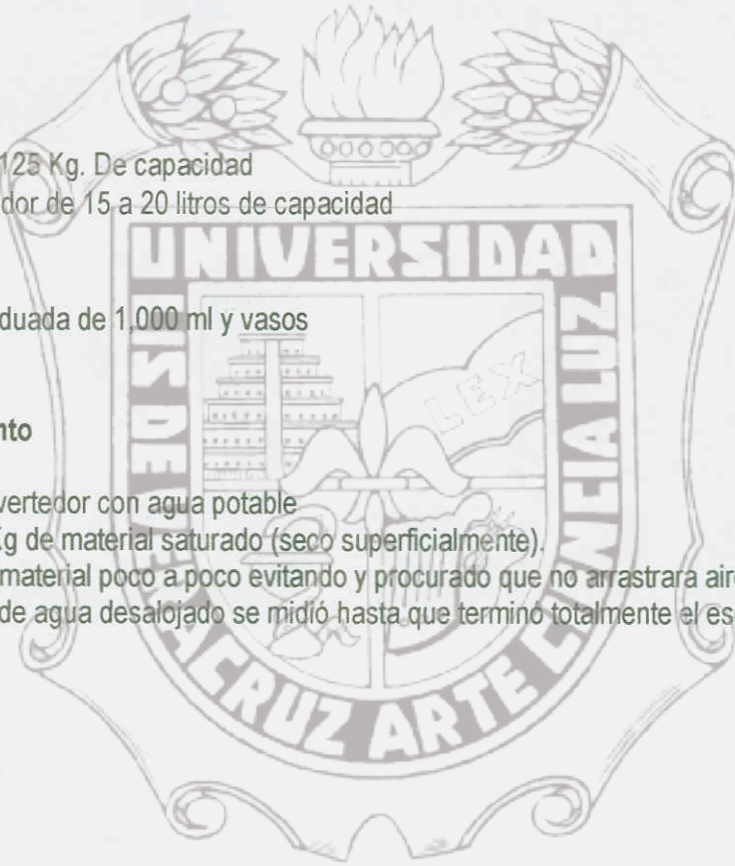
El ensayo se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, bajo la norma ASTM C-127.

7.5.5.1 Equipo

- Bascula de 125 Kg. De capacidad
- Bote o vertedor de 15 a 20 litros de capacidad
- Charola
- Cucharón
- Probeta graduada de 1,000 ml y vasos

7.5.5.2 Procedimiento

- 1) Se aforó el vertedor con agua potable
- 2) Se pesó 1 Kg de material saturado (seco superficialmente).
- 3) Se vertió el material poco a poco evitando y procurado que no arrastrara aire
- 4) El volumen de agua desalojado se midió hasta que termino totalmente el escurrimiento





a. Secado superficial del material



b. Vertido del material al picnómetro



c. Volumen de agua desalojado



d. Lectura del volumen desalojado

Imagen 7.12. Prueba de densidad del agregado grueso.

7.5.5.3 Datos y resultados de la prueba

Mediante el procedimiento, se obtuvieron los siguientes datos:

$W_{\text{grava húmeda}}$	=	1000	grs
Vol. Desalojado	=	410	ml
W_{agua}	=	410	grs

Con estos datos se calculó la densidad de la grava con la fórmula (7.3), obteniéndose:

$$\rho = 2.44$$



CAPÍTULO 8. SEGUNDO ENSAYO DE LABORATORIO. ELABORACIÓN DE CONCRETO CON FIBRAS PP

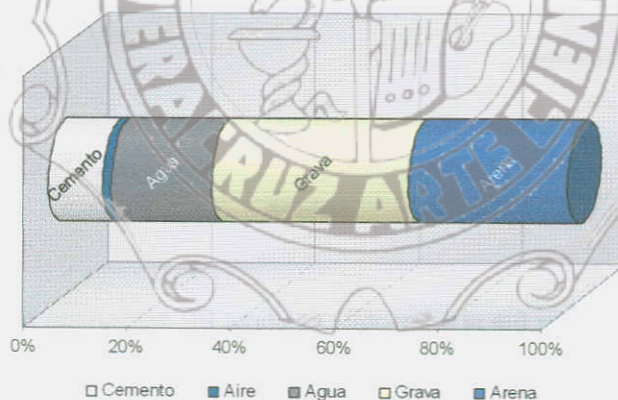
El programa experimental presentado en este capítulo estudia la influencia de las fibras de polipropileno en su resistencia a la compresión, tensión y flexión como función del porcentaje de fibra adicionada. Además se estudian los cambios en la trabajabilidad del concreto debido a la incorporación de las fibras. El modo particular en que éstas actúan en el concreto se analiza mediante ensayos de laboratorio.

Posteriormente con los datos obtenidos se buscará mediante modelos de simulación por computadora, reproducir el comportamiento de pavimentos de concreto reforzado con fibras PP para compararlo con el refuerzo tradicional de la malla electrosoldada, la cual ocasiona graves problemas de corrosión. Los resultados se compararán para determinar la posibilidad de sustituir el refuerzo tradicional en el concreto (acero) por fibras PP.

Para cuantificar el efecto de la incorporación de fibras PP al concreto, se efectuaron ensayos comparativos entre un "concreto patrón" (sin fibras) y concretos con distinto porcentajes de fibra adicionado.

El concreto patrón o común se sabe que es básicamente, una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. En esta mezcla, las partículas de agregado están completamente recubiertas por la pasta, la cual está formada por materiales cementicios y agua e incorpora aire atrapado.

Figura 8.1. Proporción aproximada de una mezcla de concreto.



Los agregados representan aproximadamente entre el 60 y el 75% del volumen total del concreto, tal como se muestra en la Figura 8.1, de ahí la importancia de conocer sus características, como se mostró en el capítulo anterior. En estas condiciones, se puede decir que un concreto normal está formado tal como se muestra en la Figura 8.2.

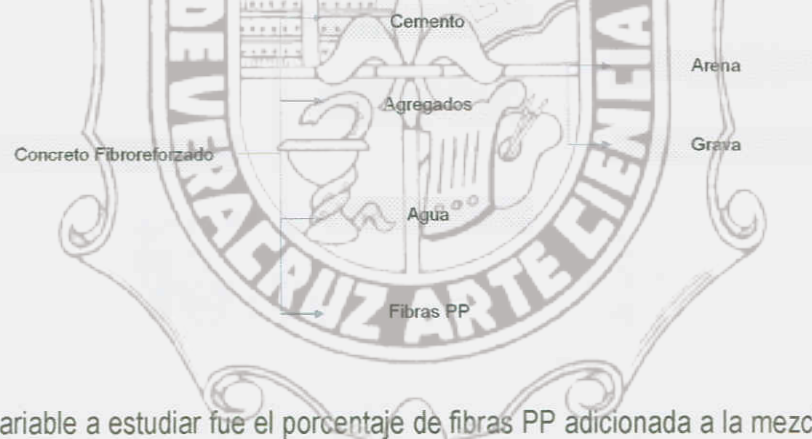
Figura 8.2. Elementos que componen un concreto normal.



Esto a diferencia de los concretos fibroreforzados, que son aquellos que están formados por un contenido de cemento hidráulico, agua, agregado grueso y fino, así como una serie de fibras discontinuas.

Para este caso particular, la fibra usada fue Sikafiber, de la casa Sika, en un largo de 19 mm., el cual es el largo estándar en que este tipo de fibra especialmente diseñada para concretos, es confeccionada.

Figura 8.3. Elementos que componen un concreto fibroreforzado.



Por lo tanto, la variable a estudiar fue el porcentaje de fibras PP adicionada a la mezcla de concreto, y su incidencia en las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido. A partir de lo anterior, se establecieron dosificaciones óptimas para el concreto reforzado con fibra de polipropileno.

La mezcla base diseñada en el laboratorio fue para una resistencia $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ sin fibras y otras 3 mezclas adicionales con diferentes porcentajes de fibras de polipropileno para analizar sus propiedades.

8.1. Dosificaciones de las mezclas

8.1.1 Materiales

Los materiales empleados en la fabricación de las mezclas de concreto son del puerto de Veracruz. Previamente en los capítulos anteriores se determinaron las propiedades de los agregados, los cuales se resumen en la Tabla 8.1.

Materiales	Características
Cemento	Cemento CPO 30 RS BRA
Arena	Arena Gruesa
Grava	TMA 1"
Agua	a/c= 0.58
Fibras	Polipropileno de 19 mm

Tabla 8.1. Características de los materiales.

A partir de los parámetros de diseño obtenidos en el capítulo anterior, las cuales se resumen en la Tabla 8.2, se procedió al diseño de la mezcla que se tomó de base de comparación (concreto patrón sin fibras PP).

Materiales a usar: Cemento Tipo II CPO 30 RS BRA
 Revenimiento = 8 - 10 cm
 $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$
 a/c = 0.58

Características	Arena	Grava	Cemento
PVS	1549	1327	
Densidad	2.48	2.44	1515
% de Abs	6.85	4.05	3.15
T. Max		1"	
M. de F.	2.81	6.93	

Tabla 8.2. Parámetros de diseño.

El programa experimental consistió en pruebas en los especímenes de concreto simple y concreto reforzado con fibras sintéticas de polipropileno (CRF), los cuales se fabricaron con agregados propios del Puerto de Veracruz.

Cabe destacar que el agregado grueso con el que se realizó el diseño del concreto, presenta en su mayoría, elementos en forma de lajas, lo que en un momento dado puede afectar el comportamiento de las mezclas de concreto, es decir, si el mismo diseño de la mezcla se realiza con un agregado grueso a base de boleas, las resistencias pueden variar sustancialmente.

8.1.2 Dosificación del concreto patrón

En primer lugar se procedió a dosificar el concreto C-250 (resistencia a la compresión de 250 kg/cm² a los 28 días). Se utilizó una relación agua cemento a/c= 0.58, con un consumo de 333 kg/m³. La Tabla 8.3 contiene el proporcionamiento de la mezcla patrón (sin fibras PP).

Material	Peso en Kg por m3 de concreto
Cemento	333
Agua de amasado	193
Agua de absorción	89
Arena	756
Grava	929
Peso Total	2,301
Relación agua / cemento	0.58

Tabla 8.3. Proporcionamiento del concreto patrón en peso por 1 m3.

8.1.2 Dosificación del concreto con fibras

La dosificación del concreto con fibras PP es similar a la del concreto convencional con la única excepción de la proporción de fibras PP en peso en diferentes porcentajes a la mezcla patrón.

Los porcentajes adicionados de fibras PP están comprendidos entre el 0.25% y el 0.75% en peso del cemento en incrementos de fibras del 0.25 % en cada ensayo. Dado lo anterior se tuvieron 4 medidas a ensayar como se indica en la Tabla 8.4.

Las dosificaciones fueron obtenidas tomando como límite inferior el 0.25%, dosificación un poco mayor a la mínima cantidad de fibra a adicionar recomendada por los diversos fabricantes de las fibras equivalentes a 0.18% en peso del cemento, y como límite superior el 0.75% el cual supera en gran medida la dosificación máxima dada por los fabricantes.

Por lo tanto, a parte de la mezcla patrón se fabricaron 3 mezclas más. A la primera mezcla se adicionaron 833 grs de fibra por m³ de concreto, lo que corresponde a una adición del 0.25% de fibras y se denominó CF1.

La segunda con los 1,667 grs de fibra por m³ de concreto, la cual corresponde al 0.50% del peso del cemento se denominó CF2.

Finalmente la tercera mezcla corresponde a una adición de fibras de 2,500 grs por m³ de concreto del 0.75% se denominó CF3.

Identificador	% de fibra PP adicionado	Cantidad en gramos
C - 250	0.00	0
CF1	0.25	833
CF2	0.50	1,667
CF3	0.75	2,500

Tabla 8.4. Tipos de concreto a ensayar.

8.1.3 Fabricación de la mezcla de concreto C-250

Las mezclas se realizaron cada una por separado, tomando como base la dosificación de la muestra patrón y adicionando a las demas los diferentes porcentajes de fibras determinadas con anterioridad. El procedimiento detallado de la confección del concreto se describe a continuación:

a. Se pesaron los agregados separadamente (gravilla y arena) en estado seco, para lo cual la arena se había dejado secar previamente a la temperatura ambiente y la grava se lavó perfectamente para retirar cualquier tipo de impurezas que pudiera contener.



Imagen 8.1. Peso y homogenización de los materiales.

- b. Se homogenizaron separadamente los áridos con el cemento mediante una revoltura a pala, para que presentaran un estado uniforme
- c. Se pesó el cemento, agua total (agua de amasado y de absorción corregida por humedad)
- d. Se revolvieron los áridos durante 30 segundos para homogenizarlos completamente
- e. Se adicionó el cemento en la mezcla
- f. Se amasaron los materiales durante 2 minutos, agregando el agua
- g. La revoltura se hizo manualmente verificando el estado de la mezcla y adicionando más agua cuando así fue necesario
- h. Se amasó durante otros 2 minutos
- i. Una vez amasado el concreto, se midió la trabajabilidad mediante el cono de Abrams
- j. La mezcla se descargó en charolas metálicas, previamente humedecidas, para el llenado de los moldes



a. Adición de agua a la mezcla

b. Obtención de la mezcla final



c. Humedecimiento de las charolas metálicas



d. Llenado de los moldes mediante la charolas

Imagen 8.2. Fabricación de la mezcla.

8.1.4 Fabricación de las mezcla de concreto CF1, CF2 y CF3

Para la fabricación de estas mezclas de concreto se realizó el mismo procedimiento que para la primer muestra hasta el inciso h), de ahí se procedió con los siguientes pasos tal y como se describe a continuación.

- i. Se pesó la cantidad de fibra a adicionar
- j. Se adicionó la fibra a la mezcla de concreto previamente mezclada
- k. Se inició un proceso de amasado de 2 minutos, durante el cual se fue incorporando paulatinamente la fibra mediante una "lluvia continua" de los filamentos sobre el concreto
- l. Se revolvió la mezcla verificando su estado (asegurándose de que la fibra se haya mezclado uniformemente y que no hayan grumos)



a. Peso de las fibras PP

b. Adición de las fibras PP a la mezcla

Imagen 8.3. Adición de fibras PP.

- m. Se amasó durante otros 3 minutos más
- n. Se colocó el concreto con fibra en una paila previamente humedecida
- o. Una vez amasado el concreto, se midió la trabajabilidad de la mezcla mediante el cono de Abrams
- p. Se moldearon las probetas correspondientes para los ensayos planificados de la colada.

Todo el proceso de mezclado de los distintos concretos requirió un tiempo aproximado de 60 minutos. La medición de la trabajabilidad y el moldeo de las probetas requirieron a su vez de otros 30 minutos. La faena de confección del concreto implicó la participación de 4 personas.

8.1.4 Identificación de los colados

Se planificó la ejecución de cuatro series de 8 coladas cada una. Cada una de las series, corresponde a uno de los 4 tipos de mezclas fabricadas. Se elaboraron 105 litros de concreto en cada serie, para elaborar los especímenes necesarios para cada prueba (cilindros y vigas).

Serie No 1: Inicialmente se elaboró la mezcla patrón C-250 y se efectuó el ensayo de trabajabilidad del concreto en estado fresco. De esta forma se tiene lo siguiente:

Serie	Colados	Litros	Probetas (cantidad)	Ensayo	Edad
Concreto patrón					
1	1			Revenimiento	Concreto fresco
1	2	12	Cilindros (2)	Tensión indirecta	7 días
1	3	12	Cilindros (2)	Tensión indirecta	14 días
1	4	12	Cilindros (2)	Tensión indirecta	28 días
1	5	12	Cilindros (2)	Compresión	7 días
1	6	12	Cilindros (2)	Compresión	14 días
1	7	12	Cilindros (2)	Compresión	28 días
1	8	30	Viguetas (2)	Flexión	28 días
Total =		102			

Tabla 8.5. Identificación de los colados para el concreto C-250.

Exactamente la misma metodología se aplicó para la Serie No.2, No.3 y No.4, las cuales corresponden sucesivamente a los concretos CF-1, CF-2 y CF-3.

8.2. Pruebas del concreto fresco

8.2.1 Prueba de revenimiento

La consistencia es una forma de calificar la manejabilidad de un concreto y se determina mediante la prueba llamada revenimiento, la cual no es otra cosa que el asentamiento que presenta una mezcla fresca al quitársele el molde en el que inicialmente se ha colocado.

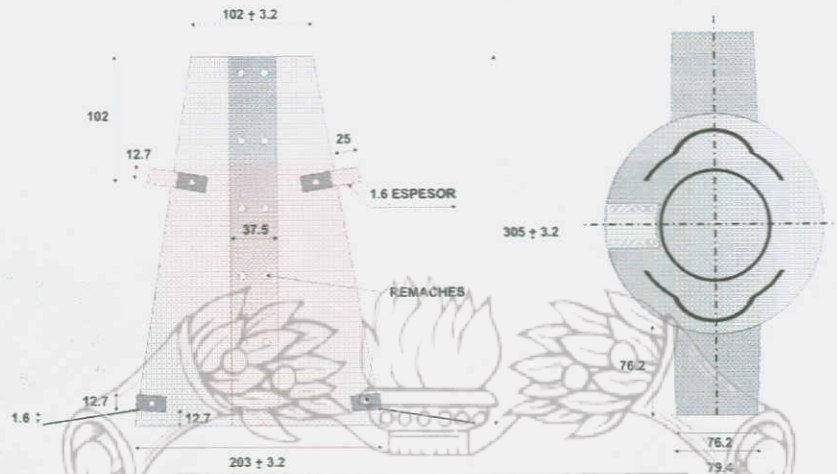
Es decir, la diferencia de altura entre el molde y la que adquiere la mezcla después de quitarlo, determina el revenimiento, el cual se expresa en centímetros y varía en función del agua adicionada a la mezcla, misma que actúa como lubricante entre las partículas que integran un concreto; por lo tanto, muestra en cierta forma la facilidad o dificultad de manejo interno que tiene una mezcla dada y la facilidad o dificultad a segregarse.

El objetivo de la prueba consistió en determinar como la adición de las fibras al concreto influyeron en su trabajabilidad. La prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 143.

8.2.2 Equipo

- Molde metálico, troncocónico, abierto por ambos extremos, con un diámetro superior de 10 cms. e inferior de 20 cms, de 30.5 cms de altura, provisto de asas y orejas para sujetarlo durante la prueba.

Figura 8.4. Molde para prueba de revenimiento.



- Cucharón metálico
- Charolas
- Varilla punta de bala lisa, de un diámetro de 1.6 cms. y 60 cms de largo y con punta en forma de casquete esférico de 16 mm de diámetro
- Placa de apoyo, rígida, no absorbente y por lo menos de 40 x 60 cms
- Escala de 30 cm graduada en mm

8.2.3 Procedimiento

- 1) La cantidad de concreto necesaria para efectuar el ensayo, no debe ser inferior a 8 lts
- 2) Se colocó el molde sobre una superficie de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos con agua, ya que de acuerdo a las normas ASTM, no se permite humedecer con aceites ni grasa.
- 3) El operador se paró sobre las orejas del molde, evitando el movimiento de éste durante el llenado
- 4) La muestra de concreto fresco, que se empleó para la prueba, se uniformizó mezclándola con el cucharón
- 5) Mediante el cucharón, se llenó el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen y se apisonó cada capa con 25 golpes de la varilla pisón distribuidos uniformemente. La capa inferior se llenó hasta aproximadamente 7 cm de altura y la capa media hasta aproximadamente 16 de altura. Al apisonar la capa inferior se dieron los primeros golpes con la varilla pisón ligeramente inclinado alrededor del perímetro. Al apisonar la capa media y superior se dieron los golpes de modo que la varilla pisón penetrara 2.5 cms. la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa se mantuvo permanentemente un exceso de concreto sobre el borde superior del molde
- 6) Se enrasó la superficie de la capa superior con la varilla pisón y se limpió el concreto derramado en la zona adyacente al molde. Inmediatamente después de terminado el llenado, enrase y limpieza, se cargó el molde con las manos, sujetándolo por las asas, dejando las

pisaderas libres y se levantó en dirección vertical sin perturbar el concreto en un tiempo de 5 a 12 segundos

- 7) Se colocó el molde a un lado de la muestra de concreto y mediante la varilla y la escala graduada se tomó la diferencia de altura. En los casos en los que la superficie de concreto era muy irregular, se tomaron tres lecturas sobre uno de sus diámetros y se promedió
- 8) Toda la operación de llenado y levantamiento del molde no demoró más de tres minutos



Imagen 8.4. Prueba de revenimiento.

8.2.4 Datos y resultados de la prueba

Una vez concluido el proceso de elaboración de cada mezcla se realizó la medida del asentamiento, para posteriormente obtener las otras características físicas de cada una de las mezclas.

El ensayo se efectuó conforme a lo señalado en la norma ASTM C-143. El concreto patrón cumplió con el requisito de tener un tamaño máximo del árido menor que 50 mm. Su trabajabilidad fue de 12 cm, por lo que está dentro de los límites establecidos para la aplicabilidad del método, esto es, entre 2 y 18 cm.

Al realizar los ensayos se observaron mínimas inclinaciones, y aún cuando hubo una pequeña disgregación del cono de concreto, existió una cohesión media y buena plasticidad en la mezcla patrón.

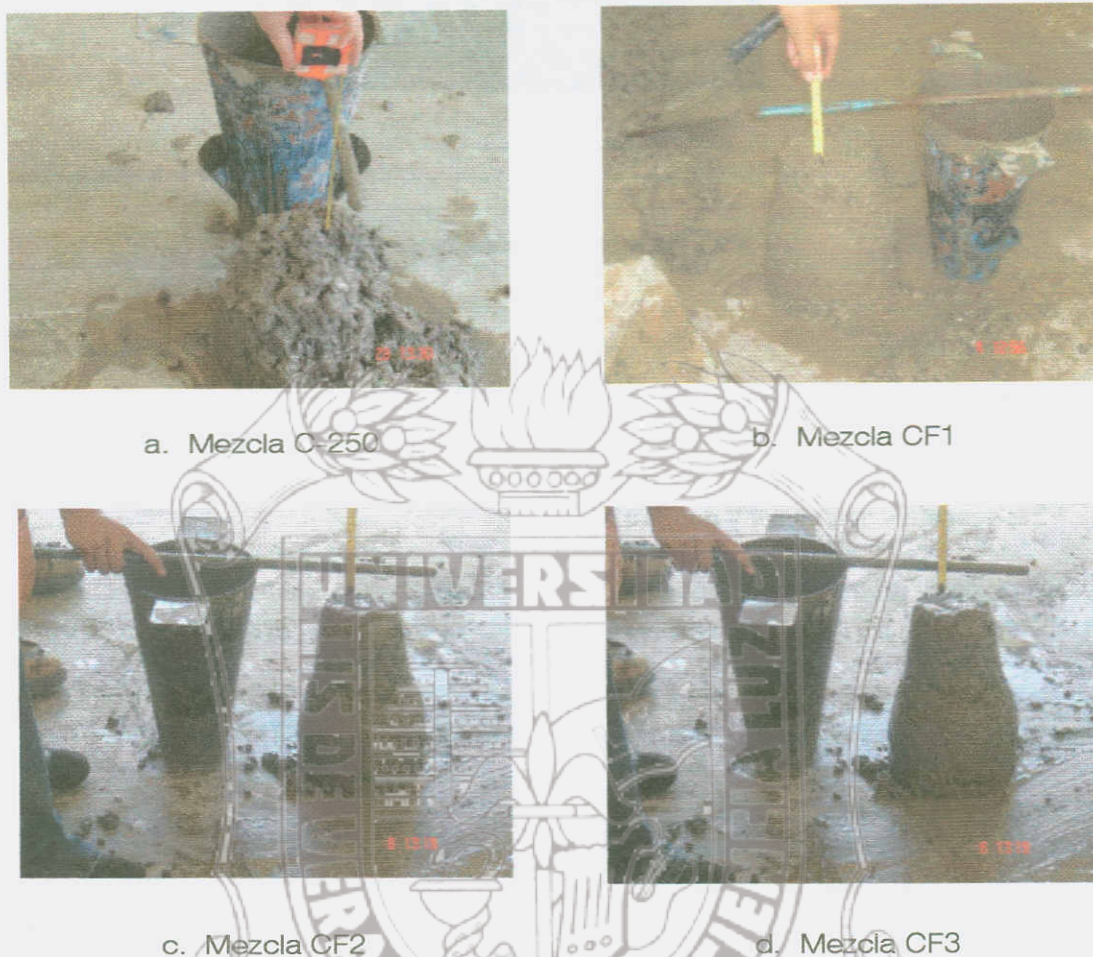


Imagen 8.5 Asentamiento del cono.

Sin embargo, en las mezclas a las cuales se les adicionaron fibras PP se detectó una mayor cohesión en relación con la muestra patrón, lo cual se observó al llenar el cono, ya que se reduce de manera significativa el revenimiento del concreto. En la Imagen 8.15 b, se observa la medida del asentamiento del cono para la mezcla CF1, la cual fue de 7.5 cm, es decir hubo una reducción de 4.5 cm en relación con la mezcla patrón.

Conforme el porcentaje de fibras se incrementa en la mezcla, la trabajabilidad de la misma se reduce, esto se aprecia en la mezcla CF2, donde la trabajabilidad fue de 5.5 cm. De igual manera para la mezcla CF3, continúa la reducción en la trabajabilidad, donde el revenimiento anduvo del orden de 4.5 cm, finalmente estos datos se agruparon en la Tabla 8.6.

Por lo tanto al disminuir la trabajabilidad en un momento dado, puede recomendarse el empleo de aditivos fluidizantes. Sin embargo, cabe destacar que pese a esta recomendación los ensayos realizados en todos los tipos de mezclas, no incluyen la adición de ningún tipo de aditivo, por lo cual el adicionar otro elemento más a la mezcla de concreto con fibras quedó fuera de los alcances de este estudio.

Tipo de mezcla	% de fibras PP en la mezcla	Promedio del asentamiento del cono (cm)
CF-250	Patrón	12.0
CF1	0.25	7.5
CF2	0.50	5.5
CF3	0.75	4.5

Tabla 8.6. Resultados de los ensayos de trabajabilidad.

8.3. Fabricación de los especímenes de ensayo

8.3.1 Especímenes de ensayo y número de replicas

La fabricación de los especímenes de ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 192 (fabricados en laboratorio), la cual cubre los requisitos para moldes y para la elaboración y curado de especímenes.

Los moldes empleados para la fabricación de los especímenes son de hierro fundido y cumplen con las tolerancias especificadas de absorción, elongación y dimensionales (ASTM C 470).

a) Compresión y tensión indirecta

Los especímenes para medir la resistencia del concreto en compresión y/o tensión indirecta son cilindros de concreto colados y fraguados en posición vertical de altura igual a dos veces el diámetro.

Una vez obtenida la trabajabilidad requerida para cada una de las mezclas, tanto para los casos de la mezcla patrón como para el concreto con fibras de polipropileno; se procedió a la confección de los cilindros.

Se decidió que 6 especímenes serían un número de muestras representativas para la prueba de tensión indirecta; adicionalmente, 6 muestras más se fabricaron para la prueba de compresión simple, dando un total de 12 cilindros. Esto se repitió para cada uno de los 4 tipos de mezclas fabricadas, por lo que en total se moldearon 48 probetas cilíndricas.

Las muestras construidas fueron cilindros de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, los cuales de acuerdo a las normas ASTM pueden usarse para un agregado máximo de 2", tal como se muestra en la Imagen 8.6.



Imagen 8.6 Fabricación de cilindros.

b) Flexión

Los especímenes para medir la resistencia del concreto en flexión son vigas de concreto colados en moldes metálicos de cuatro barras por molde.

Las muestras para la determinación de la flexión son vigas rectangulares de 15 x15 x 60 cm, tal como se muestra en la Imagen 8.7.



Imagen 8.7 Fabricación de vigas.

Para los ensayos a flexión, debido a la falta de moldes con la que se contaba en el laboratorio, solo se pudieron fabricar 2 especímenes para cada tipo de mezcla, dando un total de 8 vigas.

A continuación se menciona el procedimiento para la fabricación y curado de las probetas de concreto fresco que se destinan a ensayos de compresión, flexión y tensión indirecta por medio de la prueba Brasileña.

8.3.2 Equipo

- Aparatos de compactación: varilla punta de bala
- Moldes para confeccionar probetas destinadas a ensayos de acuerdo a la Tabla 8.7 para cada tipo de prueba, los cuales deben ser metálicos, estancos y de superficies lisas

No. De especímenes	Probeta	Ensayos	Dimensiones (cm)
6	Cilindros	Compresión	15 x 30
6	Cilindros	Tensión por prueba brasileña	15 x 30
2	Vigas	Flexión	15 x 15 x 60

Tabla 8.7 Probetas de ensayo para cada tipo de mezcla.

- La dimensión básica interior, debe ser igual o mayor a 3 veces el tamaño máximo de la grava
- En la superficie de los moldes que entran en contacto con el concreto, se aplicó una delgada capa de aceite para prevenir la adherencia

8.3.3 Procedimiento

a) Recomendaciones para la fabricación de especímenes

Las normas ASTM recomiendan que el lugar elegido para el moldeado, deba estar nivelado y protegido, ya que será el mismo para el curado inicial. Al respecto, la elaboración de los especímenes de muestra cumple con la normatividad, pues fueron moldeados en el interior del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería.

En cuanto a la compactación, la normativa recomienda que se realice por apisonado o por vibrado según sea el revenimiento obtenido en cada muestra de acuerdo a la Tabla 8.8.

Revenimiento (cm)	Procedimiento de compactación
< 5	Vibrado
5 - 10	Apisonado o Vibrado
> 10	Apisonado

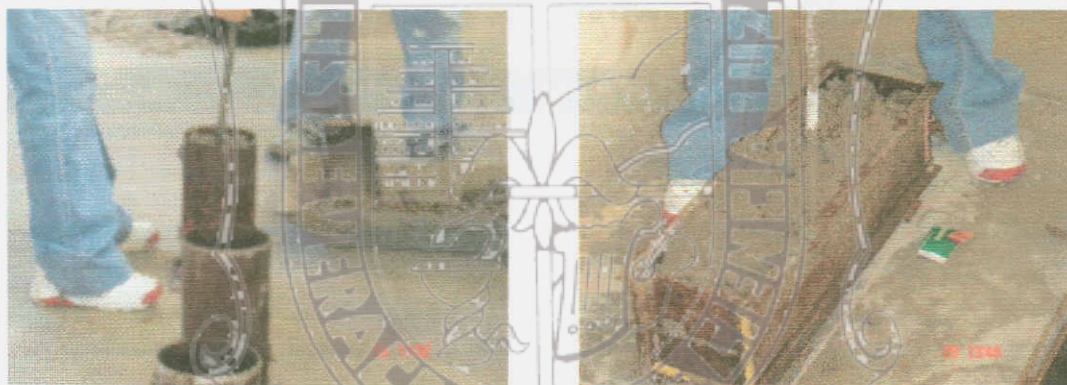
Tabla 8.8 Tipos de compactación recomendados.

b) Moldeado, compactación y apisonado

Para los *cilindros*, la mezcla de material se añadió en tres capas de espesor similar dentro de los moldes de 15 cm de arista, debidamente engrasados. Luego de depositar una capa ésta se apisonó distribuyendo 25 golpes uniformemente en toda la superficie del molde por cada capa, tal como se muestra en la Imagen 8.8 a. Al terminar el apisonado de la tercera capa se procedió al alisado superficial. El proceso total de llenado del molde tomó aproximadamente 3 minutos.

Para las *vigas* se colocó el concreto en los moldes previamente engrasados, en una sola capa. Se compactó con una varilla de acero punta de bala diámetro de 9.5 mm (3/8") dando 90 golpes distribuidos en toda el área. Después de apisonar se golpeó suavemente los costados de los moldes para cerrar los vacíos dejados por la varilla punta de bala y permitir la salida del aire, tal como se aprecia en la Imagen 8.8 b. Se fabricaron dos barras de concreto para cada tipo de mezcla.

Terminado el apisonado se procedió al alisado superficial, tal como se aprecia en la Imagen 8.9. El tiempo requerido para llenar el molde fue de aproximadamente 8 minutos.



a. Cilindros

b. Vigas

Imagen 8.8 Compactación en especímenes.

c) Terminación superficial e identificación de los especímenes de ensayo

Después de la compactación se removió el excedente de concreto de la superficie, se enrasó superficialmente con la varilla pisón con un movimiento de aserrado, evitando separar el mortero del árido grueso. No se permitió golpear la superficie del concreto. Finalmente se dejó como acabado una superficie plana, lisa y a nivel con los bordes del molde y que no contenía depresiones o sobreniveles de más de 1/8" (3.2 mm).



a. Cilindros

b. Vigas

Imagen 8.9 Terminación superficial en especímenes.

Las probetas se marcaron con marcador indeleble de modo que pudieran ser perfectamente identificadas, tal como se indica en la Tabla 8.9.

1 er Identificador	2o Identificador	3 er Identificador	4 to Identificador	Ejemplo
Tesis	Muestra 1	29/11/2005	1 = Probeta No.1	Tesis-muestra-fecha
	Muestra 2	05/12/2005	2 = Probeta No.2	
	Muestra 3	07/12/2005		
	Muestra 4	12/12/2005		
Tesis	Muestra 1	29/11/2005	1 = Probeta No.1	
	Muestra 2	05/12/2005		
	Muestra 3	07/12/2005		
	Muestra 4	12/12/2005		

Tabla 8.9 Identificación de los especímenes de ensayo

Inmediatamente después de remover el exceso de concreto y aplanar la superficie superior, los especímenes se transportaron al lugar de almacenamiento donde permanecieron sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial.

d) Desmolde y curado de las probetas

De acuerdo a las normas ASTM, los tiempos mínimos para desmoldar las probetas, son 24 ± 8 horas para cilindros y vigas, por lo tanto, los especímenes se mantuvieron en sus moldes durante 24 h protegiéndolos de la pérdida de humedad y posteriormente se colocaron dentro de un cuarto de curado hasta el momento de su ensaye.

Al terminar de desmoldar los especímenes y antes que transcurrieran 30 minutos después de haber sido removidos de sus moldes, se almacenaron en condiciones de humedad adecuadas en la cámara de curado.

El curado se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 511, la cual permite sumergir los especímenes en el interior de una cámara de curado en agua saturada con cal.



a. Cilindros

b. Vigas

Imagen 8.10 Desmolde de los especímenes.

Las probetas cilíndricas se colocan en la cámara de curado (Imagen 8.11 b). Ahí se mantuvieron por espacio de 7, 14 y 28 días, dependiendo del identificador que contenía (el segundo identificador indicaba la edad del ensayo).



a. Identificación

b. Curado

Imagen 8.11 Identificación y curado de especímenes.

Las vigas se sumergieron en la misma cámara manteniéndolas por un lapso de 28 días hasta el momento de realizar la prueba de flexión.

8.4. Características de los equipos de laboratorio

8.4.1 Equipo

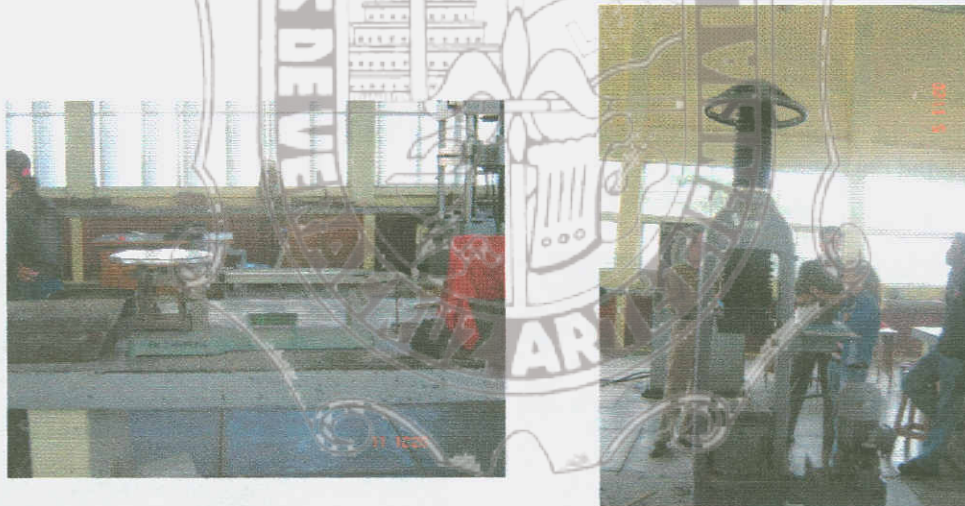
a) Báscula para el control de probetas

La optimización de la dosificación de los materiales para la elaboración del concreto se realizó con un control de peso de cada uno de los materiales que lo conformaron. La báscula utilizada tiene una capacidad de 25 Kgs.

b) Máquina universal

Los ensayos físicos de resistencia a flexión y compresión se realizaron en una máquina de ensayos universal.

En esta máquina se pueden realizar toda gama de ensayos universales mediante un dispositivo de mordazas accionado mecánicamente.



a. Báscula

b. Máquina Universal

Imagen 8.12 Equipo del laboratorio de materiales.

8.4.2 Modo de operación

Los ensayos de compresión y flexión se realizaron en la maquina de ensayos universales. El sistema de mordazas y apoyos para los ensayos a compresión y flexión son diferentes, en el de compresión son mordazas que permiten agarrar la probeta por sus dos extremos, en cambio en flexión se usa una base fija con puntos de contacto sobre los que se apoya la probeta. A una distancia equidistante entre los dos

apoyos, una cuña se sitúa sobre la probeta y el ensayo consiste en aumentar progresivamente el valor de la fuerza sobre la cuña hasta provocar la rotura del material.

Antes de iniciarse los ensayos es condición imprescindible medir las dimensiones de las probetas y contar con esos datos.

8.5. Descripción de los ensayos

8.5.1 Ensayos a compresión en cilindros

El ensayo se desarrolló de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ASTM C 39. Se ensayaron dos cilindros por cada tipo de concreto (distintos porcentajes de fibra de polipropileno adicionada a 7, 14 y a 28 días. Una vista de este ensayo puede apreciarse a continuación en la imagen 8.13 b.

8.5.1.1 Equipo

- Prensa de ensayo
- Flexómetro
- Balanza de capacidad igual o superior a 25 kgs

8.5.1.2 Procedimiento

- 1) Se midieron las probetas (lo cual se efectuó antes del cabeceo). Las probetas se retiraron del curado inmediatamente antes del ensayo y se mantuvieron mojadas hasta el ensayo por medio de franelas húmedas colocadas sobre los especímenes
- 2) Se midieron dos diámetros perpendiculares entre sí (d_1 , d_2) aproximadamente a media altura; y la altura de la probeta en dos generatrices opuestas (h_1 y h_2), aproximando a 1mm.
- 3) Se determinó el peso del cilindro, aproximando a 50 grs, para obtener el peso volumétrico del concreto
- 4) Para que la máquina universal pudiera repartir la carga uniformemente, se requirió que la superficie estuviera perfectamente bien terminada y lisa, por lo que se realizó el cabeceo de los especímenes mediante azufre de acuerdo a la norma ASTM C 617
- 5) Se limpiaron las superficies de contacto de las placas de carga y de la probeta y se colocó la probeta en la máquina de ensayo alineándola y centrándola
- 6) Se acercó la placa superior de la máquina de ensayo y se asentó sobre la probeta a modo de obtener un apoyo lo más uniforme posible
- 7) Se aplicó la carga en forma continua y sin choques
- 8) Se registró la carga máxima (P) expresada en kgs
- 9) Al dividir esta carga entre el área se obtuvo la resistencia del espécimen en kg/cm^2



a. Cabeceo de especímenes

b. Colocación del espécimen en la prensa

Imagen 8.13 Prueba de compresión.

8.5.1.3 Datos y resultados de la prueba

Los ensayos a compresión se realizaron a 7, 14 y 28 días para cada una de las 4 mezclas realizadas. De estos ensayos se obtuvieron las siguientes tablas:

a) Ensayos a 7 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	FC kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	15.00	14.90	14.95	175.54	30.0	5.27	11,757	2,232.6	21.12	120.32	7 días
2	15.20	15.10	15.15	180.27	30.5	5.50	12,330	2,242.6	23.30	129.25	7 días
F/C promedio=										124.8	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	FC kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.80	14.90	14.85	173.20	30.0	5.20	12,300	2,367.2	23.46	135.45	7 días
2	14.80	14.80	14.80	172.03	30.0	5.16	12,500	2,422.0	26.29	152.82	7 días
F/C promedio=										144.1	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	FC kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.80	14.80	14.80	172.03	30.2	5.20	11,836	2,278.2	24.37	141.66	7 días
2	15.00	14.90	14.95	175.54	30.3	5.32	12,177	2,289.4	22.18	126.35	7 días
F/C promedio=										134.0	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	15.00	14.95	175.54	30.2	5.30	11,962	2,256.4	17.51	99.75	7 días
2	15.00	15.10	15.05	177.90	30.2	5.37	11,938	2,222.1	17.73	99.67	7 días
F.C promedio=										99.7	kg/cm ²

b) Ensayos a 14 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	15.00	14.95	175.54	30.0	5.27	11,874	2,254.8	27.35	155.81	14 días
2	14.90	15.00	14.95	175.54	30.2	5.30	11,765	2,219.3	23.05	131.31	14 días
F.C promedio=										143.6	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	15.00	14.95	175.54	30.0	5.27	11,841	2,248.5	29.67	169.02	14 días
2	14.90	14.80	14.85	173.20	30.4	5.27	11,864	2,253.3	25.16	145.27	14 días
F.C promedio=										157.1	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	15.00	14.90	14.95	175.54	30.3	5.32	11,946	2,246.0	28.11	160.14	14 días
2	15.00	15.00	15.00	176.72	30.1	5.32	12,002	2,256.4	25.96	146.90	14 días
F.C promedio=										153.5	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	15.10	15.00	176.72	30.0	5.30	12,025	2,268.2	21.65	122.51	14 días
2	15.20	15.20	15.20	181.46	30.5	5.53	12,400	2,240.5	20.85	114.90	14 días
F.C promedio=										118.7	kg/cm ²

c) Ensayos a 28 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	15.10	15.0	176.72	30.0	5.30	11,884	2,241.7	44.34	250.91	28 días
2	15.00	15.00	15.0	176.72	30.0	5.30	11,854	2,236.0	33.65	190.42	28 días
F.C promedio=										220.7	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	15.20	15.20	15.20	181.46	30.0	5.44	11,908	2,187.5	41.11	226.55	28 días
2	15.20	15.00	15.10	179.08	30.0	5.37	11,820	2,200.1	45.80	255.75	28 días
F.C promedio=										241.2	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	15.00	15.00	15.0	176.72	30.0	5.30	12,031	2,269.4	49.52	280.23	28 días
2	14.90	14.90	14.9	174.37	30.2	5.27	11,978	2,274.6	38.27	219.48	28 días
									F.C promedio=	249.9	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	F.C kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	14.90	14.90	14.9	174.37	30.1	5.25	12,300	2343.6	31.67	181.63	28 días
2	15.20	15.00	15.1	179.08	29.9	5.35	12,500	2334.5	33.67	188.02	28 días
									F.C promedio=	184.9	kg/cm ²

8.5.2 Resistencia a la tensión. Prueba brasileña

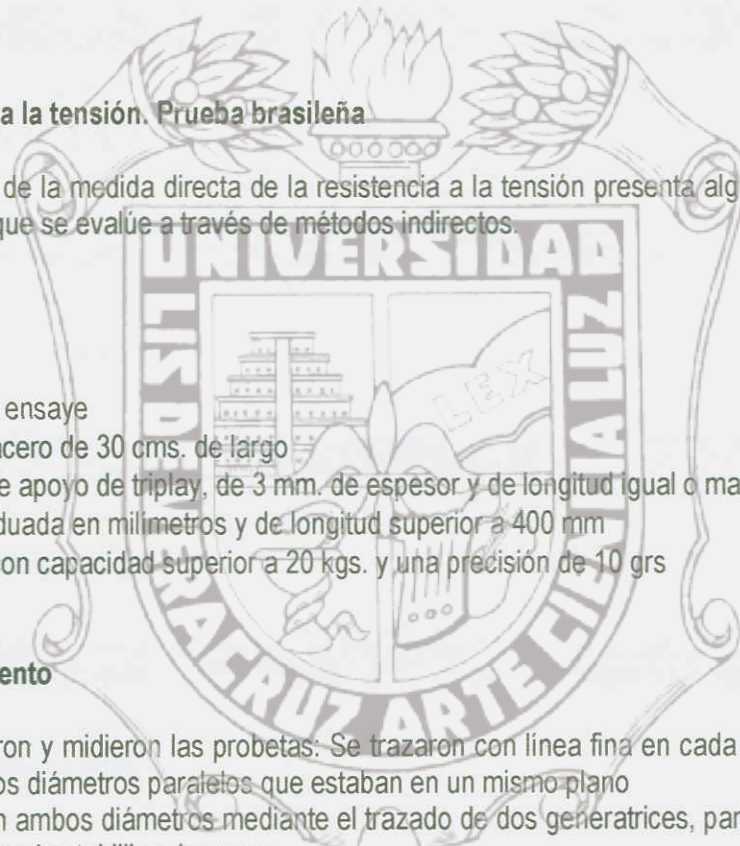
La materialización de la medida directa de la resistencia a la tensión presenta algunas dificultades, por esto es frecuente que se evalúe a través de métodos indirectos.

8.5.2.1 Equipo

- Prensa de ensaye
- Placa de acero de 30 cms. de largo
- Tablillas de apoyo de triplay, de 3 mm. de espesor y de longitud igual o mayor a la de la probeta
- Regla graduada en milímetros y de longitud superior a 400 mm
- Balanza, con capacidad superior a 20 kgs. y una precisión de 10 grs

8.5.2.2 Procedimiento

- 1) Se marcaron y midieron las probetas. Se trazaron con línea fina en cada una de las bases del cilindro, dos diámetros paralelos que estaban en un mismo plano
- 2) Se unieron ambos diámetros mediante el trazado de dos generatrices, para definir las líneas de contacto con las tablillas de apoyo
- 3) Se registró el diámetro (d) de la probeta como el promedio de tres diámetros, medidos sobre el trazado de las generatrices en el centro y los extremos del cilindro, aproximando a 1 mm
- 4) Se registró la longitud (l) del cilindro como el promedio de las longitudes de las dos generatrices trazadas, aproximando a 1 mm
- 5) Se registró el peso del cilindro aproximando a 20 grs
- 6) Se limpiaron las superficies de contacto de las placas de carga y la probeta
- 7) Se colocó una tablilla de triplay de apoyo con dimensiones de 1/8" x 1" x 12 pulg, centrada sobre el eje de la placa inferior de la máquina universal
- 8) Se colocó el cilindro con su eje horizontal entre las platinas de la máquina de prueba, sobre la tablilla de apoyo y se alineó de modo que las líneas de trazado diametral quedaran verticales y centradas sobre la tablilla



- 9) Se colocó una segunda tablilla de apoyo centrada sobre la línea de contacto superior de la probeta
- 10) Se aplicó la carga en forma continua y sin choques de velocidad hasta la falla por separación a lo largo del diámetro vertical
- 11) Se obtuvo el registro de la carga máxima (P) expresada en kgs



a. Colocación de mordazas

b. Centrado de espécimen

Imagen 8.14 Prueba de tensión indirecta.

8.5.2.3 Datos y resultados de la prueba

Al igual que para evaluar las propiedades a la compresión del concreto, se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días, obteniendo los siguientes resultados:

a) Ensayos a tensión a 7 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.00	15.00	15.00	176.72	30.0	5.30	11,795	2,224.9	11.17	1,413.72	15.80	7 días
2	14.90	14.90	14.90	174.37	30.0	5.23	11,715	2,239.5	10.15	1,404.29	14.51	7 días
Resist. a la tensión promedio=											15.16	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	14.90	15.00	14.95	175.54	30.0	5.27	12,300	2,335.7	12.04	1,409.00	17.09	7 días
2	15.00	15.00	15.00	176.72	30.0	5.30	12,500	2,357.8	12.90	1,413.72	18.25	7 días
Resist. a la tensión promedio=											17.67	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.00	15.00	15.00	176.72	30.2	5.34	12,071	2,261.8	13.54	1,423.14	19.03	7 días
2	14.90	14.90	14.90	174.37	30.2	5.27	11,898	2,259.5	11.90	1,413.65	16.84	7 días
Resist. a la tensión promedio=											17.93	kg/cm ²

2da Parte. Planteamiento y desarrollo de la investigación

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.00	15.00	15.00	176.72	30.1	5.32	12,000	2,256.0	8.70	1,418.43	12.27	7 días
2	15.00	15.00	15.00	176.72	29.9	5.28	11,714	2,217.0	9.16	1,409.00	13.00	7 días
Resist. a la tensión promedio=											12.63	kg/cm ²

b) Ensayos a tensión a 14 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.00	15.00	15.00	176.72	30.4	5.37	12,020	2,237.5	13.45	1,432.57	18.78	14 días
2	14.90	15.00	14.95	175.54	30.0	5.27	11,700	2,221.7	12.97	1,409.00	18.41	14 días
Resist. a la tensión promedio=											18.59	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.20	15.30	15.25	182.65	30.8	5.63	12,350	2,195.3	16.34	1,476.81	22.15	14 días
2	15.20	15.10	15.15	180.27	30.4	5.48	12,020	2,193.4	14.80	1,446.89	20.46	14 días
Resist. a la tensión promedio=											21.38	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	14.90	14.80	14.85	178.20	30.1	5.21	11,800	2,263.5	14.82	1,404.24	21.11	14 días
2	15.00	15.20	15.10	179.08	30.6	5.48	12,511	2,283.1	11.90	1,451.60	16.40	14 días
Resist. a la tensión promedio=											18.75	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.00	14.80	14.90	174.87	30.2	5.27	11,820	2,244.6	10.57	1,413.65	14.95	14 días
2	14.80	15.10	14.95	175.54	29.9	5.25	11,900	2,267.3	10.50	1,404.31	14.95	14 días
Resist. a la tensión promedio=											14.95	kg/cm ²

c) Ensayos a tensión a 28 días

Especímenes de concreto patrón

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.10	15.00	15.05	177.90	30.1	5.35	12,030	2,246.6	18.78	1,423.16	26.39	28 días
2	15.00	14.90	14.95	175.54	30.0	5.27	11,700	2,221.7	20.21	1,409.00	28.69	28 días
Resist. a la tensión promedio=											27.54	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	15.10	14.90	15.00	176.72	30.0	5.30	11,727	2,212.0	23.27	1,413.72	32.92	28 días
2	15.00	14.90	14.95	175.54	30.0	5.27	11,825	2,245.5	24.33	1,409.00	34.54	28 días
Resist. a la tensión promedio=											33.73	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De espécimen	D.S	D.I	D.M	A.M	H	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Área tracción	Tracción	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm ²	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	cm ²	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	14.90	14.80	14.85	173.20	30.0	5.20	12,071	2,323.2	20.58	1,399.58	29.41	28 días
2	15.10	14.90	15.00	176.72	30.2	5.34	11,898	2,229.4	21.16	1,423.14	29.74	28 días
Resist. a la tensión promedio=											29.57	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP												
No. De espécimen	D.S cm	D.I cm	D.M cm	A.M cm ²	H cm	Vol m ³	PESO Kg	P.V Kg/m ³	Carga de Rup Ton	Área tracción cm ²	Tracción kg/cm ²	Fecha de Colado (y de ruptura)
1	15.10	15.00	15.05	177.90	30.1	5.35	11,974	2,236.2	17.49	1,423.16	24.58	7 días
2	15.00	14.80	14.90	174.37	30.1	5.25	11,850	2,257.8	14.21	1,408.97	20.17	7 días
Resist. a la tensión promedio=											22.37	kg/cm ²

8.5.3 Ensayos a flexión. Módulo de ruptura

Esta prueba se realizó en la máquina universal, efectuando el ensaye en viguetas prismáticas de concreto simplemente apoyadas; se consideró necesario realizar el ensaye por tratarse de un concreto con aplicación a pavimentos.

Para el ensaye la máquina universal dispone de un juego de mordazas de accionamiento manual donde se situó la probeta de ensayo para someterla a esfuerzos de flexión.

El ensayo de flexión se ejecutó basado en la norma ASTM C 78, la cual indica que para las vigas de 15 x 15 x 60 cm, el ensaye se debe realizar con dos cargas puntuales del mismo valor, aplicadas en los límites del tercio central de la luz de ensayo. Se escogió una luz de ensayo de 46 cm, de esta manera se respeta la distancia mínima de 2,5 cm que debe quedar entre las líneas de apoyo y los extremos de la probeta.

8.5.3.1 Equipo

- Prensa de ensaye
- Dispositivo de flexión con piezas de apoyo de la probeta y piezas para aplicar la carga
- Regla rectificadora de una longitud mínima de 500 mm

8.5.3.2 Procedimiento

- 1) Se volteó el espécimen de prueba húmedo para que quedara de lado con respecto a su posición de cómo fue moldeado, y se pudiera centrar en los bloques de apoyo
- 2) Se aplicó la carga a una velocidad uniforme hasta que ocurrió la ruptura
- 3) Se midió el ancho y la profundidad promedio del espécimen y con la fórmula (5.4) presentada en el apartado 5.3 inciso B.4, se calculó el módulo de ruptura

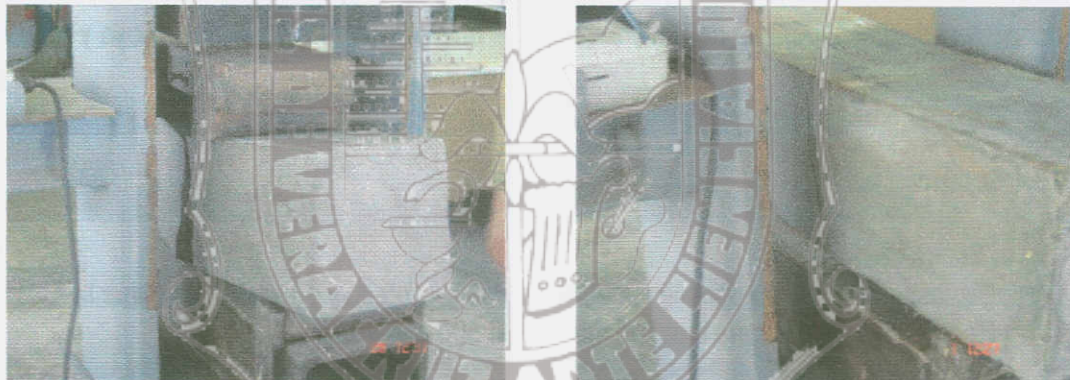


a. Colocación de la viga

b. Centrado de espécimen

Imagen 8.15 Preparaciones para la prueba de flexión.

La Imagen 8.16 muestra el ensayo a flexión de los 4 tipos de mezclas elaboradas, donde se aprecia que conforme los niveles de fibras PP se incrementan, al momento de la falla ambas caras del elemento permanecen unidas.



a. Muestra CF-250

b. Muestra CF1



c. Muestra CF-2



d. Muestra CF3

Imagen 8.16 Prueba de flexión.

8.5.3.3 Datos y resultados de la prueba

Para evaluar el módulo de ruptura se ensayaron 2 vigas a los 28 días para cada una de las mezclas elaboradas, obteniendo los siguientes resultados:

Especímenes de concreto patrón

No. De especimen	L	b	d	t	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Mr	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	46.00	15.00	15.05	60.1	13.57	30,415	2,241.7	2.68	36.29	28 días
2	46.00	15.00	15.05	60.1	13.57	30,337	2,236.0	3.32	44.95	28 días
Mr promedio=									40.6	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.25% de fibras PP

No. De especimen	L	b	d	t	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Mr	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	46.00	14.85	14.90	60.0	13.28	29,041	2,187.5	3.66	51.07	28 días
2	46.00	15.10	14.90	60.0	13.50	29,700	2,200.1	3.61	49.54	28 días
Mr promedio=									50.3	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.50% de fibras PP

No. De especimen	L	b	d	t	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Mr	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	46.00	15.00	15.05	60.3	13.61	30,893	2,269.4	3.48	47.12	28 días
2	46.00	15.10	15.00	60.2	13.64	31,015	2,274.6	3.67	49.69	28 días
Mr promedio=									48.4	kg/cm ²

Especímenes de concreto con el 0.75% de fibras PP

No. De especimen	L	b	d	t	Vol	PESO	P.V	Carga de Rup	Mr	Fecha de Colado
	cm	cm	cm	cm	m ³	Kg	Kg/m ³	Ton	kg/cm ²	(y de ruptura)
1	46.00	15.00	15.10	60.0	13.59	30,825	2,268.2	2.93	39.41	28 días
2	46.00	15.00	14.75	60.1	13.30	29,792	2,240.5	2.46	34.68	28 días
Mr promedio=									37.0	kg/cm ²

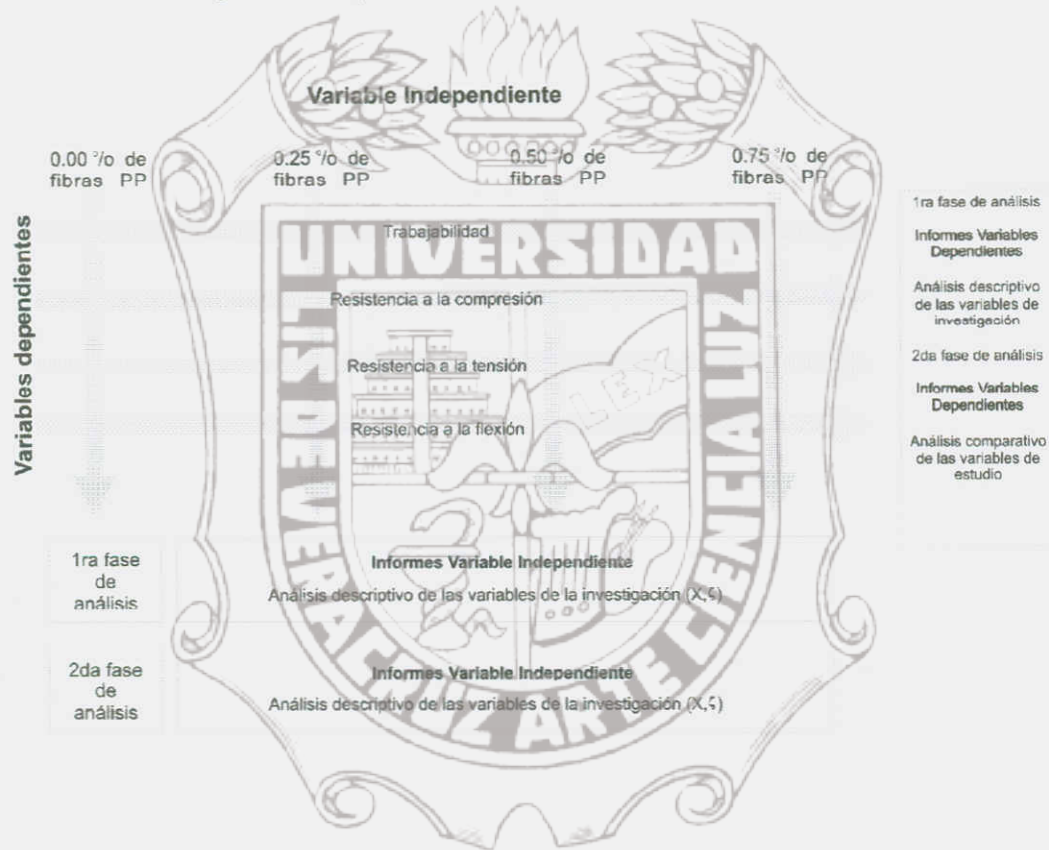


CAPÍTULO 9. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS: INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA PP ADICIONADO

Los resultados se agruparon en dos secciones, la primera corresponde a las variables dependientes de la adición de la fibra a las mezclas de concreto, como son trabajabilidad, resistencia a la compresión, tensión y resistencia a la flexión.

La segunda sección corresponde a la interrelación que existe a cada incremento de fibra en el concreto, es decir el comportamiento del concreto en función de la variable independiente, esto se siguió de acuerdo a la Figura 9.1.

Figura 9.1. Interpretación de los resultados de la investigación.



9.1 Comportamiento de las fibras PP en el concreto

9.1.1 La fase matriz

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una, llamada matriz que es continua y rodea a la otra fase, denominada fase dispersa. Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas.

Para el caso del concreto con fibras PP, **la matriz** (pasta formada por cemento, agua y los agregados) ejerce varias funciones. En primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y

transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; sólo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistida por la matriz.

En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente.

Finalmente, la matriz separa las fibras, y así aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes, que forman un agregado de tamaño crítico.

Por esta razón, es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. Por lo tanto, la resistencia a la tensión final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión.

9.1.2 Funcionamiento de las fibras PP en el concreto

Al adicionar fibras PP a una mezcla de concreto y revolverlas, el refuerzo que provocan estas fibras se extiende en tres direcciones, y gracias a la flexibilidad de las fibras PP, se envuelven alrededor de todo el agregado grueso, así la mezcla de concreto se envuelve alrededor de las fibras durante el proceso de mezclado, las cuales a su vez forman una vinculación mecánica con la mezcla.

El diseño experimental para los ensayos del laboratorio se realizó de acuerdo a las prácticas estándares de la American Society for Test and Measure (ASTM) y la American Concrete Institute (ACI).

Los especímenes se probaron mecánicamente y los datos fueron presentados en el capítulo anterior.

Estos resultados se graficaron, y estas gráficas, así como la interpretación del comportamiento de los especímenes conforme el volumen de fibras aumentó en las mezclas, es lo que se presenta en este capítulo.

9.2 Análisis de las variables dependientes

Dentro de este análisis los resultados se dividen a su vez básicamente en dos grupos, las pruebas de trabajabilidad realizadas al concreto fresco y las pruebas de resistencia realizadas al concreto endurecido.

El concreto patrón se diseñó para una calidad nominal, expresada como resistencia a la compresión a los 28 días, de 250 kg/cm².

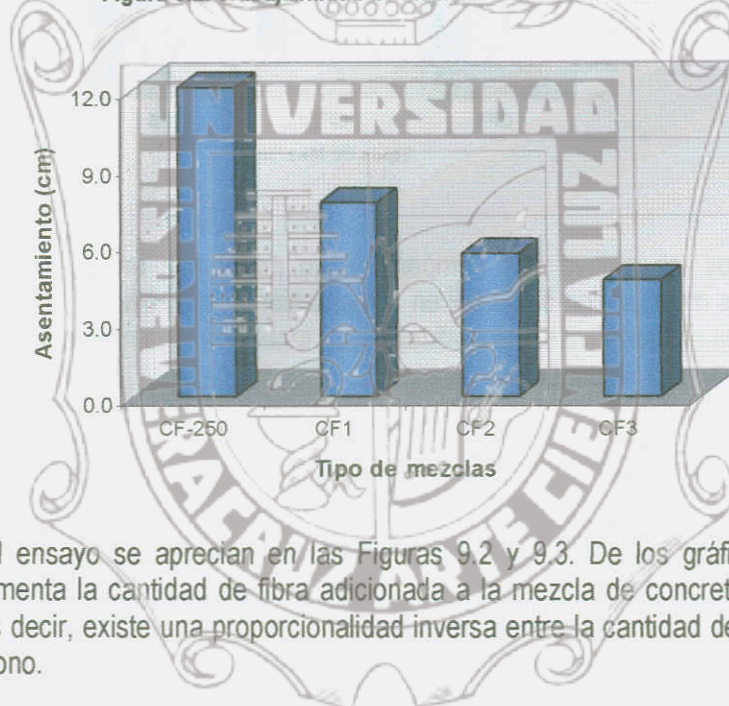
9.2.1 Concreto fresco

9.2.1.1 Trabajabilidad

Una vez concluido el proceso de mezclado se realizaron las medidas del asentamiento, para posteriormente obtener las otras características físicas de las mezclas, de donde se pudo apreciar que la pérdida de trabajabilidad del concreto es proporcional a la concentración del volumen de fibras.

Con el ensayo de trabajabilidad se logró apreciar una clara influencia de la presencia de las fibras en el concreto fresco, observándose una disminución de la docilidad de la mezcla a medida que se incrementó el porcentaje de fibras de polipropileno.

Figura 9.2. Trabajabilidad de las mezclas de concreto.



Los resultados del ensayo se aprecian en las Figuras 9.2 y 9.3. De los gráficos se observa, que conforme se incrementa la cantidad de fibra adicionada a la mezcla de concreto el asentamiento de cono es menor. Es decir, existe una proporcionalidad inversa entre la cantidad de fibra adicionada y el asentamiento de cono.

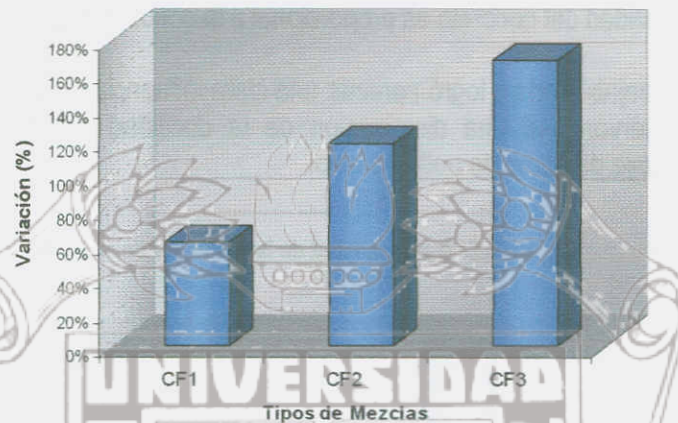
El mayor asentamiento de cono correspondió a la mezcla patrón con 12.0 cm, mientras que el menor alcanzó a los 4.5 cm, es decir, siete y medio centímetros de diferencia, respecto del mayor. Este último valor correspondió a la mezcla CF3, que como se indica en la Tabla 9.1, contiene 0.75% de peso en fibra de polipropileno.

Tipo de mezcla	% de fibras PP en la mezcla	Promedio del asentamiento del cono (cm)	Variación en relación de la mezcla patrón (%)
CF-250	Patrón	12.0	-
CF1	0.25	7.5	60%
CF2	0.50	5.5	118%
CF3	0.75	4.5	167%

Tabla 9.1. Comparación en la trabajabilidad de las mezclas.

Por lo tanto, se determinó que, con la incorporación de fibras, la trabajabilidad disminuye entre un 167% y un 60%, con respecto al concreto patrón, dependiendo de la cantidad de fibra adicionada.

Figura 9.3. Variación en el asentamiento en función del porcentaje de fibras PP.



De estos resultados, se obtuvo una comparativa en porcentaje en cuanto a la reducción de la trabajabilidad de las mezclas con fibras PP en comparación con la mezcla patrón, tal como se muestra en la Tabla 9.1. Esta comparativa se ha graficado para tener una idea más clara de los datos obtenidos, los cuales se reflejan en la Figura 9.3.

El menor porcentaje de variación entre la mezcla patrón y las mezclas con fibras PP lo tiene el concreto CF1, que tiene un porcentaje de fibra adicionado de 0.25% en peso. Esta variación con respecto a la mezcla patrón alcanzó al 60%, tal como se aprecia en la Figura 9.3. Por su parte la máxima variación con respecto a la mezcla patrón correspondió a la mezcla CF3. Esta variación corresponde al 167%. La mezcla CF2 (0.50% de fibras PP en peso) ocupa un valor intermedio, obteniendo una variación del 118% con respecto a la mezcla patrón, respectivamente.

Sin embargo, la pérdida de asentamiento no necesariamente significa que hay una pérdida en la trabajabilidad de la mezcla, al menos para porcentajes bajos de fibra (menores al 1% en peso) como los utilizados.

De estas variaciones se observa que por cada incremento de 0.25% de fibras PP a las mezclas, el asentamiento se reduce un 100% de la mezcla anterior, por lo que de mantenerse esta tendencia, no es recomendable que la adición de fibras PP a las mezclas de concreto sea mayor al 1.5%, pues de ser así se llegaría al punto en que la mezcla ya no se pueda manejar fácilmente y requiera de un vibrado especial, colocación con rastrillo e inclusive que no sea costeable su uso por el tiempo y las dificultades que conlleve su colocación.

9.2.2 Concreto endurecido

9.2.2.1 Ensayos a compresión

Los ensayos a compresión se realizaron para los 7, 14 y 28 días. De dichos ensayos se obtuvieron los valores de la resistencia a la compresión para cada una de las cuatro mezclas fabricadas, los cuales se presentaron en el capítulo anterior.

Con estos resultados se obtuvieron las resistencias promedios para cada tipo de mezcla. Estos resultados se tabularon en la Tabla 9.2 y aparecen tabulados en la Figura 9.4 con la finalidad de facilitar su interpretación.

Tipo de mezcla	F'c	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	125	
0.25%	144	15.51%
0.50%	134	7.39%
0.75%	100	-20.10%

Tabla 9.2. Resumen de la resistencia a la compresión a 7 días.

Los resultados obtenidos indican, que el incremento de la cantidad de fibra en el concreto aumenta la resistencia a la compresión hasta el 0.25%, de ahí en adelante el incremento en la resistencia todavía se presenta, pero este aumento es pequeño. Si se continúa adicionando fibras PP al concreto, la mezcla en lugar de tener un incremento decrece notablemente su resistencia hasta un 20%.

Figura 9.4. Resistencia a la compresión a los 7 días.



En la Figura 9.4 se aprecia que el comportamiento de la fibra en la matriz de concreto se presenta como una campana de Gauss, al inicio se incrementa la resistencia del concreto con pequeños incrementos de fibra y continúa así hasta un punto en el que la resistencia comienza a decrecer, y aún peor se llega a un volumen crítico de adición de fibras que lejos de mejorar las propiedades del concreto, le perjudica reduciendo sustancialmente su resistencia.

Otra segunda serie de cilindros se mantuvo en el cuarto de curado durante 14 días, posteriormente fue sometida a la máquina universal, de donde se obtuvieron los resultados presentados en el capítulo anterior, cuyo resumen se presenta en la Tabla 9.3.

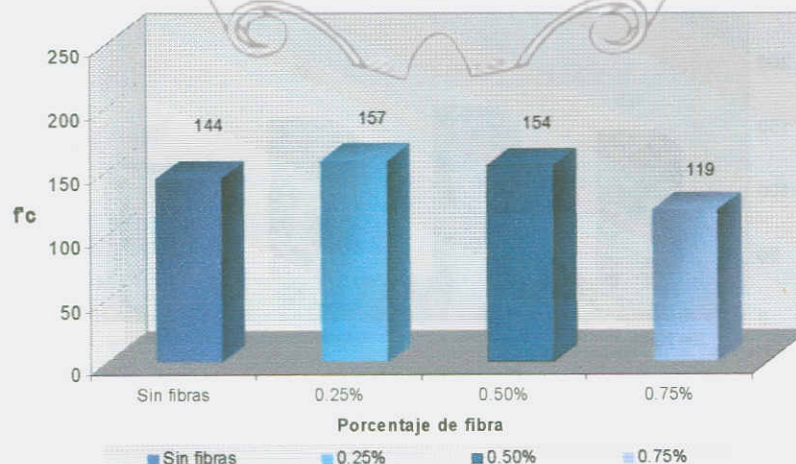
Tipo de mezcla	F'C	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	144	-
0.25%	157	9.46%
0.50%	154	6.94%
0.75%	119	-17.31%

Tabla 9.3. Resumen de la resistencia a la compresión a 14 días

Los resultados de esta tabla se han graficado en la Figura 9.5, de donde se observa que a los 14 días el incremento a la resistencia a la compresión del concreto en la mezcla CF1 ha disminuido, pues a los 7 días el incremento en la resistencia en comparación con la mezcla patrón fue del 15.51% mientras que a los 14 días solamente es del 9.46%.

Sin embargo, la tendencia en el incremento de la resistencia se mantiene en la mezcla CF1 (0.25% de fibra PP), y conforme se incrementan los valores de fibras en la mezcla, estos valores decrecen hasta llegar a la mezcla CF3, la cual muestra una reducción del 17% en relación con la mezcla sin fibras.

Figura 9.5. Resistencia a la compresión a los 14 días



Es importante destacar, que mientras el incremento de la resistencia en la mezcla CF1 ha decrecido en porcentaje, lo mismo ha ocurrido con la mezcla CF3, la reducción en la resistencia en comparación de la mezcla patrón también se ha reducido del 20.1% al 17.3%, en relación a los ensayos realizados a los 7 días.

En el ensayo a 28 días, el valor máximo de la resistencia fue alcanzado por el concreto CF2, incrementando su resistencia un 13.2% en comparación con la mezcla patrón con una resistencia a la compresión de 196 kg/cm², mientras que el concreto CF1 solo alcanzó un valor de 189 kg/cm².

Por lo que aquí el comportamiento de los especímenes cambió radicalmente, pues mientras la mezcla CF1 se mantuvo con un incremento del 9% aproximadamente como en el ensayo a los 14 días, el CF2 pasó de un 6.9% a un 13.2% en incremento de la resistencia.

Finalmente, la mezcla CF3 mantuvo el mismo comportamiento reduciendo la resistencia en relación a la mezcla sin fibras en un 16.2%, muy parecido al 17.3% obtenido a los 28 días. El resultado de los ensayos a compresión a los 28 días se muestra en la Tabla 9.4.

Tipo de mezcla	F'C	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	221	-
0.25%	241	9.28%
0.50%	250	13.23%
0.75%	185	-16.24%

Tabla 9.4. Resumen de la resistencia a la compresión a 28 días

Los valores anteriores se trasladaron a la Gráfica 9.6, en donde se observa que a los 28 días a pesar de que se continua presentando el comportamiento de la campana de Gauss, el punto máximo se ha desplazado de la muestra CF1 la cual contiene un incremento del 0.25% en peso, a la muestra CF2, que contiene un porcentaje del 0.50 de fibras PP.

A pesar de esto la Figura 9.6 muestra que si bien hay un efecto en el aumento de la resistencia a la compresión a medida que se adiciona mayor porcentaje de fibras PP, el incremento porcentual es muy poco, variando entre el 15 y el 7%, con respecto a la muestra sin fibras, en el caso de los 7 días, entre el 9 y casi 7% a los 14 días, y entre el 9 y el 13% en el caso de ensayos a los 28 días.

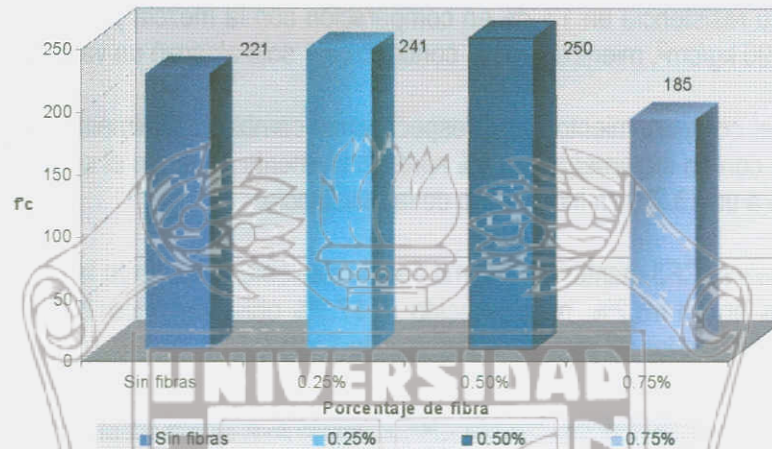
Los valores máximos fueron obtenidos por la muestra CF1 a los 7 y 14 días, y por la mezcla CF2 a los 28 días. Correspondiendo en todos los casos el menor valor a la mezcla CF3.

Por lo que puede decirse que el 0.75% de fibras PP va más allá del volumen crítico, el cual en lugar de ocasionar un beneficio a las propiedades mecánicas, solamente dificulta su manejo y ocasiona una reducción en su resistencia.

Las resistencias a compresión a los 7 días de los especímenes anda en promedio alrededor del 55% de la resistencia de diseño de la muestra patrón del concreto, lo que para un cemento especializado que

contiene puzolanas como lo es el cemento tipo CPC 30 RS BRA se encuentra dentro de los parámetros convencionales.

Figura 9.6. Resistencia a la compresión a los 28 días



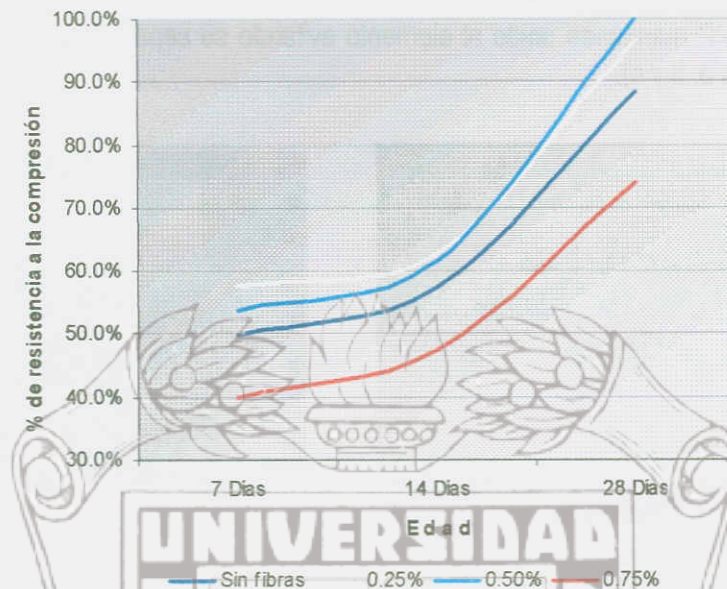
De igual manera, la resistencia a los 14 días de los especímenes sometidos a compresión anda alrededor de 60%, y para los 28 días mediante los ensayos se puede observar que se ha alcanzado entre el 88% y el 100% de la resistencia a la compresión (f_c) de diseño, por lo que a partir de esta información se ha obtenido la curva para la Figura 9.7, que muestra el comportamiento a diversas edades de ensayo para las cuatro mezclas ensayadas en el laboratorio.

Cabe aclarar que a pesar de no haber obtenido la resistencia total a los 28 días en todas las mezclas, por ser un cemento que contiene puzolanas estos resultados han sido un poco variables, sin embargo, por el comportamiento de los especímenes ensayados, se puede decir que estos elementos fácilmente en 15 días más son capaces de alcanzar su resistencia de diseño; esto aún para la muestra CF3 que es en la cual se aprecia su más baja resistencia.

Al mismo tiempo se aprecia de la Figura 9.7 que el incremento de la resistencia en todas las mezclas entre los 7 y 14 días no es significativo, pues anda alrededor del 5%, sin embargo, su resistencia casi se duplica en algunos casos de los 14 a los 28 días.

El adicionar fibras de polipropileno a las mezclas de concreto tiene un efecto significativo en el modo y mecanismo de falla de los cilindros en el ensayo a compresión. El concreto con fibras falla de un modo más dúctil. Mientras que los cilindros en la muestra patrón se fragmenta debido a la incapacidad de absorber energía; en los cilindros de concreto con fibra continúa manteniendo la carga y resiste deformaciones, agrietándose el elemento completo sin que existan separaciones.

Figura 9.7. Evolución de la resistencia a la compresión con la edad.



9.2.2.2 Ensayos a tensión indirecta

Los ensayos a tensión indirecta mediante la prueba brasileña se realizaron para los 7, 14 y 28 días. De dichos ensayos se obtuvieron los resultados para cada una de las cuatro mezclas fabricadas, cuyos valores se presentaron en el capítulo anterior.

Con éstos resultados se obtuvieron las resistencias promedio, los cuales se graficaron en la Figura 9.8, con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados.

Tipo de mezcla	t	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	15.2	-
0.25%	17.7	16.58%
0.50%	17.9	18.31%
0.75%	12.6	-16.64%

Tabla 9.5. Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a 7 días.

Se puede concluir con base en los resultados que para cualquier adición de fibras se presentan pequeños incrementos en la resistencia los cuales andan del orden del 16% al 18%. Sin embargo, independiente del incremento de resistencia que se tiene, el comportamiento de los especímenes que contienen fibra varía en relación a la muestra patrón en que, la mezcla sin fibras al llegar a la falla se separa mientras que a mayor porcentaje de fibras el elemento se mantiene unido aún después de haber llegado a la falla, tal como se aprecia en la Imagen 9.1 a.

La diferencia radica en que en los especímenes con fibras, la carga se reparte produciendo agrietamientos en diferentes partes del espécimen, no solo a la mitad, y aún cuando se presenta la fractura las fibras PP mantienen unido al elemento evitando su separación, tal como se aprecia en la Imagen 9.1 (incisos a, b y c).

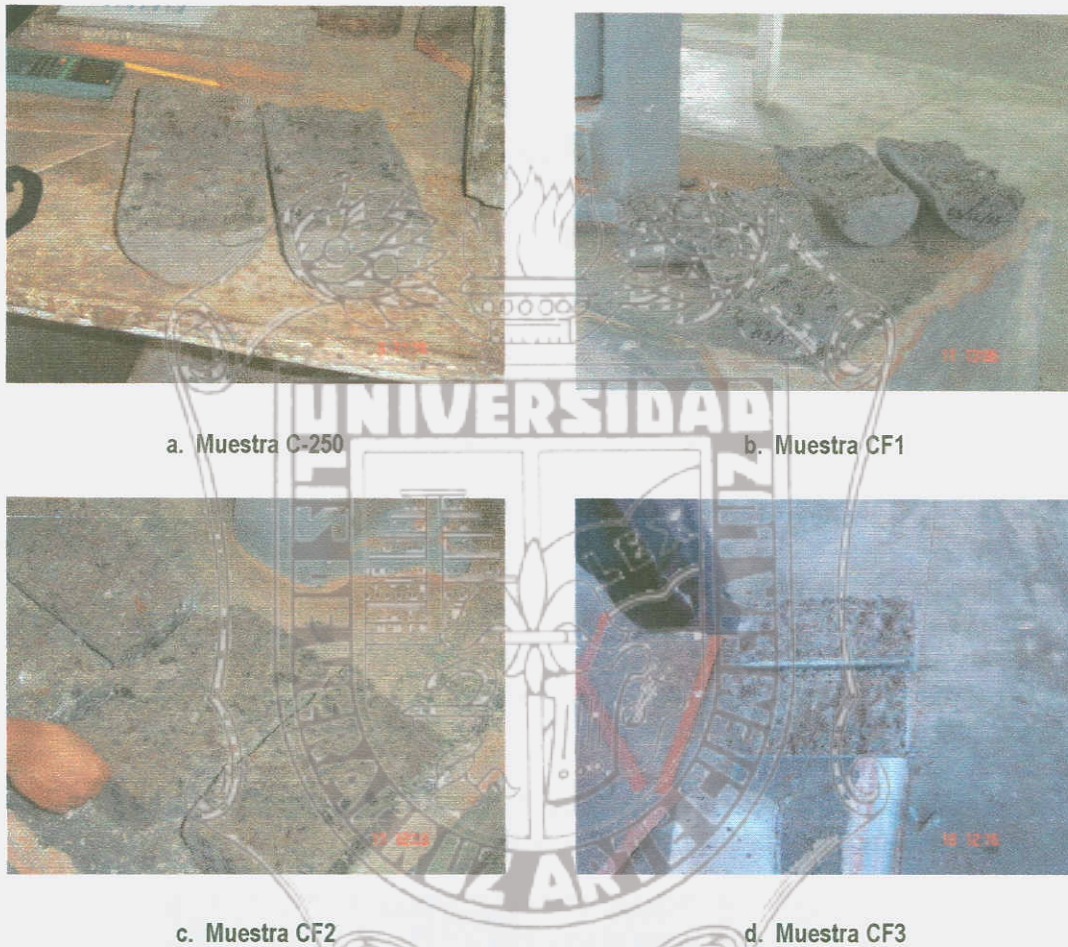
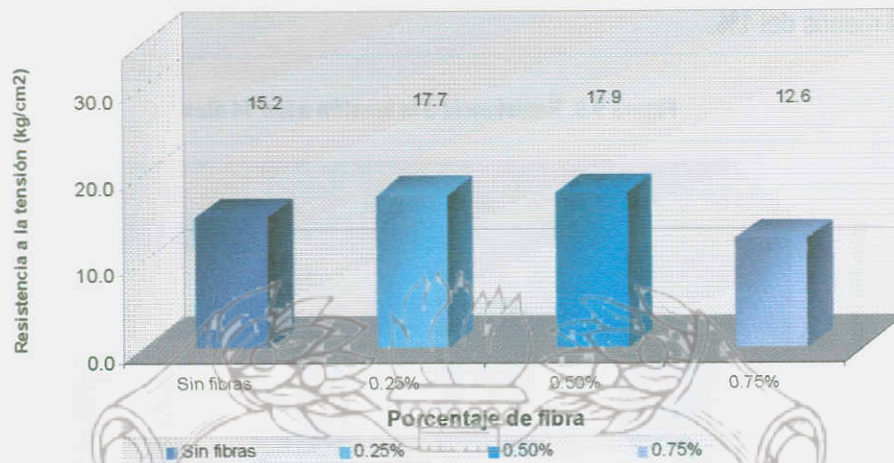


Imagen 9.1 Ensayo a tensión indirecta a 7 días.

De los resultados se puede concluir, que si bien al aumentar la cantidad de fibra adicionada aumenta la resistencia a la tensión, este aumento es pequeño, sin embargo, en relación a los agrietamientos el comportamiento del elemento mejora notablemente conforme los porcentajes de fibras se incrementan a la mezcla.

De la Figura 9.8 se aprecia que mientras la resistencia menor a los 7 días alcanzó los 12.6 kg/cm², correspondiendo este valor a la mezcla CF3, el mayor valor alcanzó a los 17.9 kg/cm², obtenido por la mezcla CF2.

Figura 9.8. Resistencia a la tensión a los 7 días.



Otra segunda serie de igual número de cilindros se mantuvo en el cuarto de curado durante 14 días, posteriormente fue sometida a la máquina universal a la prueba brasileña, de donde se obtuvieron los resultados presentados en el capítulo anterior, cuyo resumen se presenta en la Tabla 9.6.

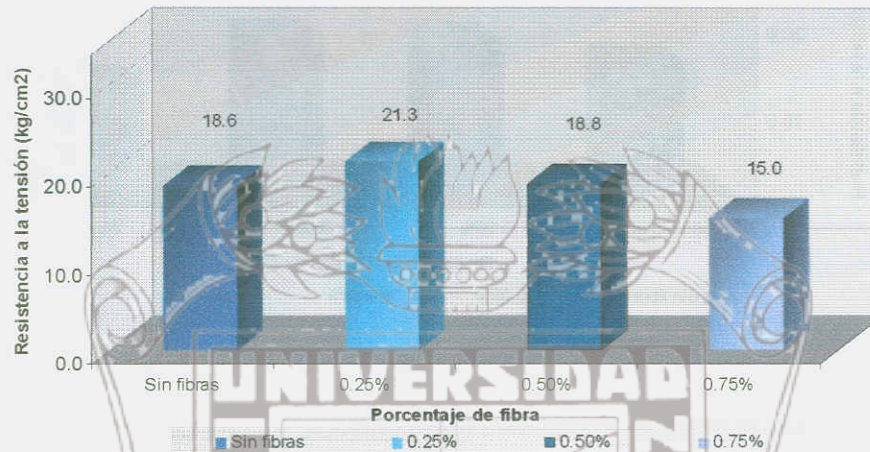
Tipo de mezcla	t	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	18.6	-
0.25%	21.3	14.57%
0.50%	18.8	0.85%
0.75%	15.0	-19.58%

Tabla 9.6. Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a 14 días.

De la tabla anterior se observa que a los 14 días, el incremento en la resistencia a la tensión del concreto varía del 14 al 1%, encontrándose valores desde 21.3 kg/cm² hasta 18.8 kg/cm², para las muestras CF1 y CF2 respectivamente, sin embargo, la muestra CF3 continua presentando el mismo comportamiento que en los especímenes ensayados a compresión, es decir, se produjo una reducción en la resistencia al agrietamiento en relación con la muestra patrón del casi 20%.

Se aprecia claramente el cambio sustancial de la muestra CF2, ya que a los 7 días su resistencia era muy similar a la muestra CF1, y a los 14 días esta resistencia a la tensión ha decrecido sustancialmente del 18.3% al menos del 1%.

Figura 9.9. Resistencia a la tensión a los 14 días



Finalmente los resultados obtenidos a los 28 días se resumieron y agruparon al igual que en los casos anteriores. La Tabla 9.7 muestra un resumen de las resistencias a la compresión ensayadas.

Tipo de mezcla	t	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	27.5	-
0.25%	33.7	22.47%
0.50%	29.6	7.38%
0.75%	22.4	-18.75%

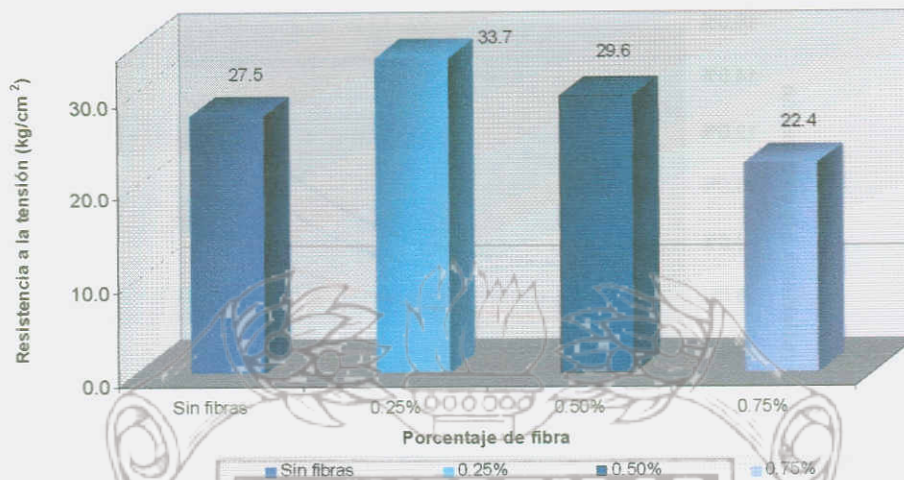
Tabla 9.7. Resumen de la resistencia a la tensión indirecta a 28 días.

De la tabla anterior se observa que a los 28 días, el incremento en la resistencia a la tensión del concreto en la mezcla CF1 se incrementa del 14.5% al 22.5%, mientras que la mezcla CF2 también sufre un incremento del 0.85% al 7.3%, encontrándose a los 28 días valores desde 33.7 kg/cm² hasta 22.4 kg/cm².

Sin embargo, el comportamiento de la mezcla CF3 se ha mantenido prácticamente igual, ya que a los 14 días mostraba un decremento del 19.5% y a los 28 días su decremento es del 18.7%.

Por lo tanto para esta prueba el mejor comportamiento lo ha presentado la mezcla CF1, donde se aprecia que los incrementos en la resistencia a la tensión comienzan a ser importantes, por lo que se avala su empleo en concretos destinados a pavimentos.

Figura 9.10. Resistencia a la tensión a los 28 días

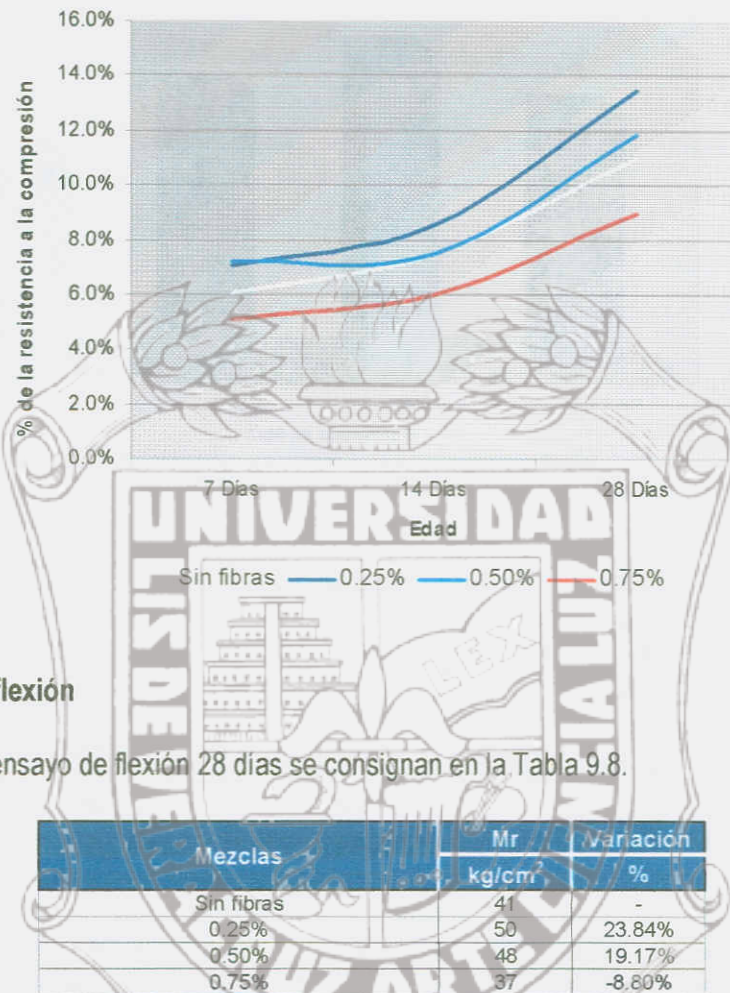


Tanto a los 7 días como a los 28 días el porcentaje de aumento de la resistencia a la tensión con respecto de la mezcla patrón, parece ser similar fijando un tipo de mezcla con fibra. Por ejemplo, para la mezcla CF1 la variación a los 7 días alcanzó al 16.5% mientras que para los 28 días, el mismo concreto registró 22.5% de variación respecto a la mezcla patrón. Una situación similar ocurre con la mezcla CF3, que registró valores en decremento de 16.6% y 18.7% de variación con respecto a la mezcla patrón, a los 7 y 28 días, respectivamente. Solamente la única mezcla que se disparó en sus resistencias a la tensión fue la CF2, tal y como ya se había mencionado anteriormente.

En un concreto clásico (sin fibras) su resistencia a la tensión es aproximadamente del orden del 10 al 15% de su resistencia a la compresión, lo que quiere decir que la mezcla patrón está dentro de los parámetros normales y que el diseño realizado es correcto, tal como puede apreciarse en la Figura 9.11.

El adicionar fibras de polipropileno a las mezclas de concreto tiene un efecto significativo en el modo y mecanismo de falla de los cilindros, pues se sigue presentando el mismo fenómeno que en los ensayos a compresión, en donde el espécimen sin fibra al momento de fallar se disgrega y separa, a diferencia de los especímenes que sí contienen fibra que a pesar de que el mecanismo de falla ha llegado al elemento este se continúa manteniendo unido.

Figura 9.11. Evolución de la resistencia a la tensión con la edad.



9.2.2.3 Ensayos a flexión

Los resultados del ensayo de flexión 28 días se consignan en la Tabla 9.8.

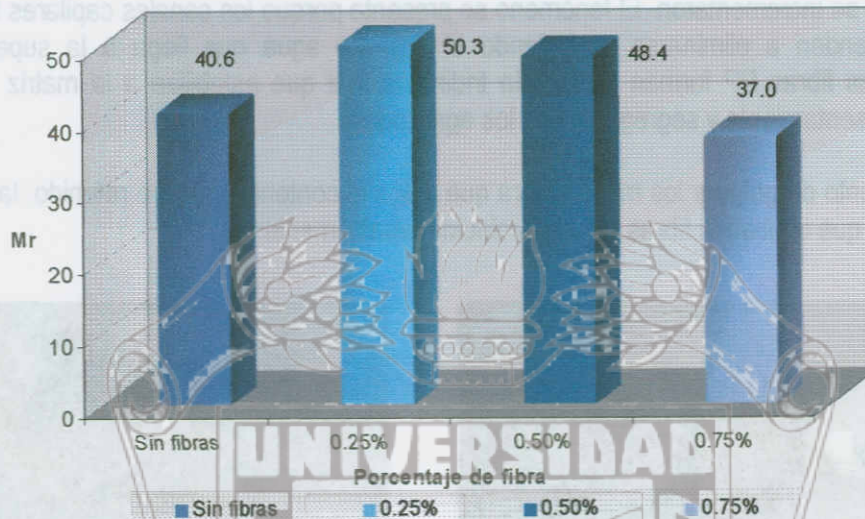
Mezclas	Mr	Variación
	kg/cm ²	%
Sin fibras	41	-
0.25%	50	23.84%
0.50%	48	19.17%
0.75%	37	-8.60%

Tabla 9.8. Resumen de la resistencia a la flexión a 28 días.

Al realizar el ensayo de flexión se observa un importante aumento de la resistencia del concreto en la mezcla CF1, sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de fibra presente en la mezcla de concreto, tal como muestra la gráfica de la Figura 10.12, el módulo de ruptura decrece. Destaca, en este sentido el hormigón el concreto CF1, que registra el valor más alto, siendo ésta de 50 kg/cm² para los 28 días. Por su parte el menor valor lo registró el concreto CF3 con 37 kg/cm².

Por lo tanto, el mejor comportamiento es para la mezcla CF1, ya que presentó un incremento del casi 24% en relación con la mezcla patrón, seguida de la mezcla CF2 con un 19%, y finalmente al igual que en las pruebas anteriores, la mezcla CF3 presentó un decremento del 8% en relación con la mezcla sin fibras.

Figura 9.12. Resistencia a la flexión a los 28 días.



Del análisis de los resultados de la presente investigación unido a la investigación bibliográfica, se desprende que algunas de las aplicaciones prácticas del concreto reforzado con fibras PP serían las losas, pavimentos industriales y en general cualquier aplicación portuaria como son losas en muelles, pilotes, rampas de botado, etc., ya que los principales incrementos de la resistencia del concreto se logran a tensión, tanto en la prueba de tensión indirecta como en la prueba de flexión en donde el incremento de la mezcla CF2 alcanza niveles superiores de resistencia al 22%, lo cual no ocurrió en las pruebas a la compresión del elemento, en donde los mayores incrementos apenas sobrepasan el 15%.

9.3 Análisis del comportamiento del concreto en función de la variable independiente

a) Curado inicial

Cuando el concreto está en estado fresco inicia su proceso de deshidratación y empieza a perder agua, esto se observa en los especímenes de concreto fabricados sin fibras PP.

En un concreto sin fibras, lo ideal es que el concreto sea trabajable pero no se debe segregar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos como son la arena y grava dentro de la masa.

Sin embargo, durante la fabricación de las muestras de concreto fresco, se observó que conforme se incrementó la cantidad de fibra el sangrado en la superficie es cada vez menor que el que se presentó

en la muestra patrón (sin fibras). En las mezclas con fibras se observó una menor segregación al momento de la fabricación de los especímenes cilíndricos y las vigas.

Por lo tanto, es clara la disminución del agua exudada en la mezcla conforme los volúmenes de fibras de polipropileno se incrementaron. El fenómeno se presenta porque los canales capilares formados por la exudación tienden a eliminarse, reduciendo el flujo de agua que llega a la superficie. Como consecuencia las fibras PP forman una malla tridimensional que estabiliza a la matriz de concreto, previniendo el asentamiento y segregación de los agregados.

Incluso al momento de golpear los moldes para que salga el contenido de aire retenido, la segregación en las muestras que contienen fibras se ve disminuida notablemente.

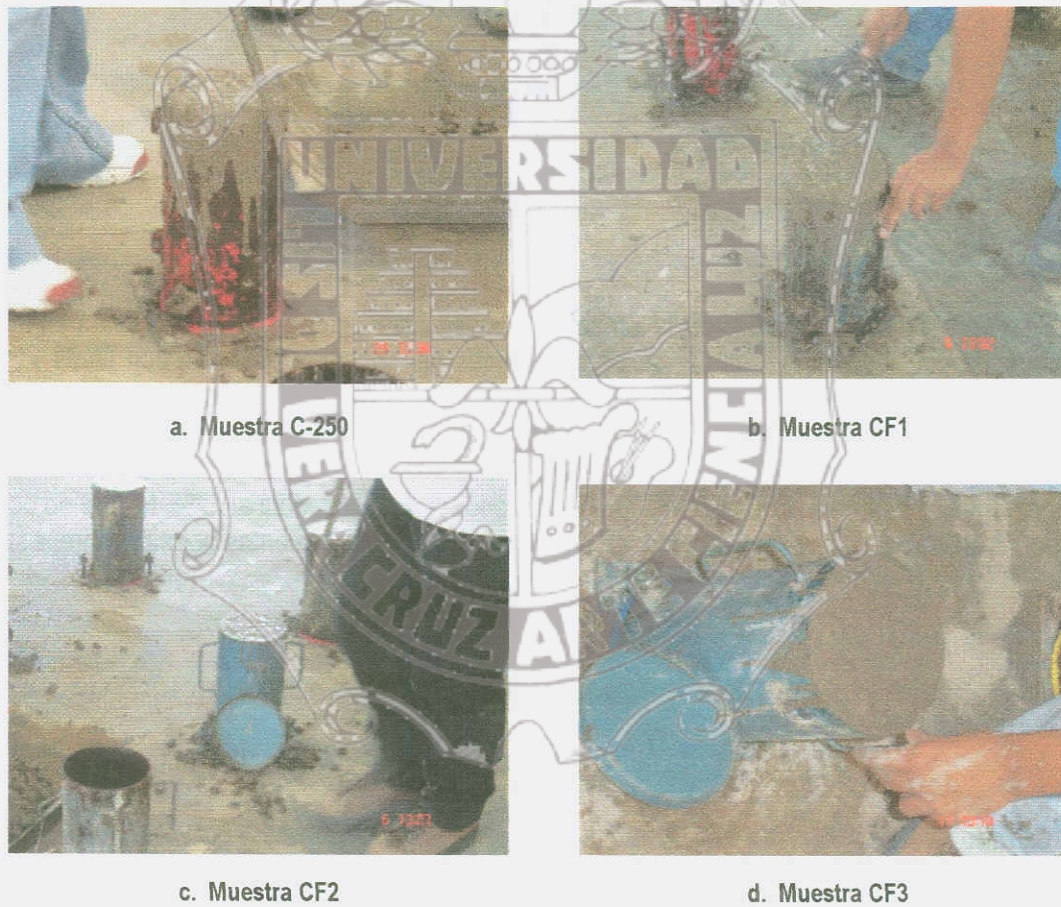


Imagen 9.2 Exudación en la fabricación de especímenes.

Estos efectos observados en el laboratorio coinciden con autores que afirman que

“Existe una relación entre la cantidad de agua exudada y la configuración del concreto”.

Se ha comprobado que a mayores cantidades de agua perdida en las primeras horas de fabricación del concreto, se presentan mayores cantidades de fisuras, de donde se puede concluir que las tasas de evaporación de agua, inciden determinadamente en el grado de fisuración del concreto, por lo que la adición de fibras ayuda a evitar los agrietamientos.

b) Agrietamiento

La adición de fibras a las mezclas de concreto se realizó en incrementos del 0.25%. El comportamiento de las mezclas estuvo directamente afectado por las cantidades de fibras PP adicionadas. Estas variaciones se notaron en el concreto en estado fresco en la trabajabilidad.

En estado endurecido, la adición de fibras PP se aprecian en las gráficas anteriores pero la principal diferencia en el comportamiento que se pudo observar en el laboratorio, es ver como ayudaron a reducir los agrietamientos, ya que a mayor cantidad de fibras los especímenes disminuyeron sus fisuras.

En la prueba de tensión indirecta los especímenes de la muestra patrón (sin fibras), al momento de llegar a la carga de ruptura, se abrieron prácticamente a la mitad con un corte casi perfecto, pero se presentaron algunas disgregaciones.

Esta separación del elemento es la principal diferencia con los especímenes que contenían fibras PP, los cuales en lugar de permitir la separación del espécimen, la fibra repartió la carga, haciendo al elemento más resistente al repartir los esfuerzos en todas direcciones y evitar que se concentren en un solo punto.

Finalmente, en las muestras con fibras, al llegar a la carga de ruptura, los elementos fueron capaces de soportar más carga y se mantuvieron unidos por medio de las fibras, lo que evitó que se separaran como en la muestra patrón (sin fibras).



Imagen 9.3 Adherencia entre concreto y fibras PP.

Una observación que conviene mencionar es la buena adherencia que existió entre el concreto y la fibra de polipropileno, lo cual a pesar de los incrementos de resistencia a la compresión y tensión, al momento de ocurrir la falla el agregado grueso se fracturó trabajando todo el espécimen como un concreto monolítico, y la fibra a pesar de que ya se había presentado la fractura continuo manteniendo unidos a los agregados.

Esta adherencia se debió al lavado previo del agregado grueso, ya que al ocurrir la falla, el espécimen se "corta" tal y como se muestra en la Figura 9.3, y no solo se desprenden las fibras. Este comportamiento deja claro lo importante que es lavar los agregados en la obra con la finalidad de lograr una mejor calidad del concreto, evitando así posibles contaminaciones provocadas por impurezas o contaminantes que se pudieran encontrar en los agregados.

De los resultados obtenidos, se puede afirmar que una aplicación práctica de las fibras pueden ser los pavimentos, ya que en el caso que se forme o se produzca una grieta, al llegar a la fibra ésta impedirá su propagación, tal y como se ha demostrado con el comportamiento de los especímenes sometidos a tensión indirecta en el laboratorio. Por lo tanto, a mayor cantidad de fibras contenidas en el concreto se incrementa a su vez la posibilidad de que una grieta sea detenida por alguna de ellas y se evite la propagación del agrietamiento.

En un pavimento, de acuerdo a su comportamiento en el laboratorio ante efectos de flexión y tensión se espera que las fibras trabajen como puntos de transferencia de tensión a todo lo largo de las fisuras, auxiliando al concreto en la transición del estado fresco al endurecido, ya que en el estado plástico el concreto presenta una mayor tendencia de fisurarse, siendo así que el uso de las fibras PP en el concreto puede funcionar para retardar la expansión de la primera fisura.

Dicho de otra forma, entre mayor sea el número de fibras PP en las mezclas es más fácil detener la propagación de las grietas, ya que las fibras PP trabajan soportando la tensión que el concreto por si solo no es capaz de resistir, lo que aplicado a las losas de pavimentos se traduce como una forma de disminuir los agrietamientos durante su transición del estado fresco al estado endurecido por los efectos de contracción plástica.



Imagen 9.4 Exceso de poros en la muestra CF3.

Sin embargo, los resultados de las pruebas indican que las mejoras en el comportamiento de las mezclas por adición de las fibras PP se detienen hasta llegar al volumen óptimo de fibras en la mezcla, pues cuando la adición de fibras pasa de este volumen, en lugar de ocurrir un incremento en la resistencia a la tensión y al agrietamiento, el exceso de fibras impiden una buena compactación de la mezcla, así como su colocación en obra.

Este comportamiento estuvo reflejado la muestra CF3 tal como se muestra en la Figura 9.4, en la cual el exceso de fibras impidió que se realizara una compactación adecuada, por lo que existió en los especímenes una mayor cantidad de poros, la cual no se pudo reducir a pesar de que los cilindros se sometieron al mismo proceso de varillado que las muestras anteriores.

Esta cantidad de aire contenida en el espécimen (porosidad) provocó un decremento notable en la resistencia de los cilindros y vigas en todas las pruebas realizadas.

c) Transferencia y absorción de tensiones por las fibras PP

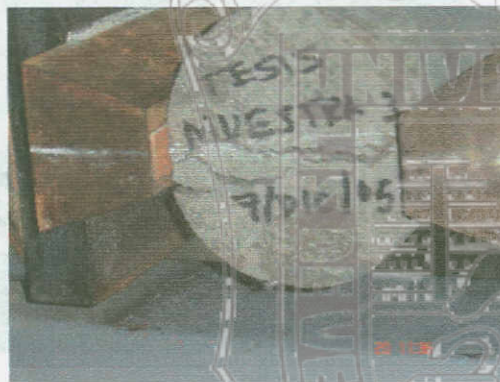
La contribución significativa de las fibras de polipropileno es que sirven como enlace o puente de transferencia en las tensiones ocurridas en la masa de concreto, lo cual se observó en la prueba brasileña.



a. Muestra C-250



b. Muestra CF1



c. Muestra CF2



d. Muestra CF3

Imagen 9.5 Ensayo a tensión indirecta a 14 días.

La carga inicialmente soportada por el concreto fue transferida a las fibras, las cuales interceptaron las fisuras, sirviendo así como un punto de transferencia de las tensiones ocurridas a lo largo de la fibra, controlando de esta manera la abertura del espécimen.

Por lo tanto, la abertura de las fisuras fue controlada por las fibras, lo cual también depende del grado de adherencia de la fibra a la matriz de concreto para que no ocurra desprendimiento de ésta al incrementarse la carga aplicada a los especímenes de ensaye.

Entre menor sea el volumen de fibras de polipropileno en la mezcla, al aplicarle carga al espécimen son mayores los esfuerzos de tensión y la probabilidad de que aparezca antes la primera fisura aumenta. Esta situación se verificó en los cilindros sometidos a la prueba brasileña (tensión indirecta) donde a mayor volumen de la fibra cuando aparece la primera grieta, ésta se propaga manteniendo unido al espécimen.



a. Muestra C-250



b. Muestra CF1



c. Muestra CF2



d. Muestra CF3

Imagen 9.6 Ensayo a tensión indirecta a 28 días.

De acuerdo a estudios realizados se sabe que la fisuración por contracción ocurre en las primeras horas, es por eso que el enfoque de esta investigación abarca la metodología experimental para el concreto con y sin fibras PP observando los especímenes realizados desde su fabricación y siguiendo su comportamiento hasta los 28 días.

9.4 Obtención de la cantidad óptima de fibras PP para el diseño de un pavimento portuario

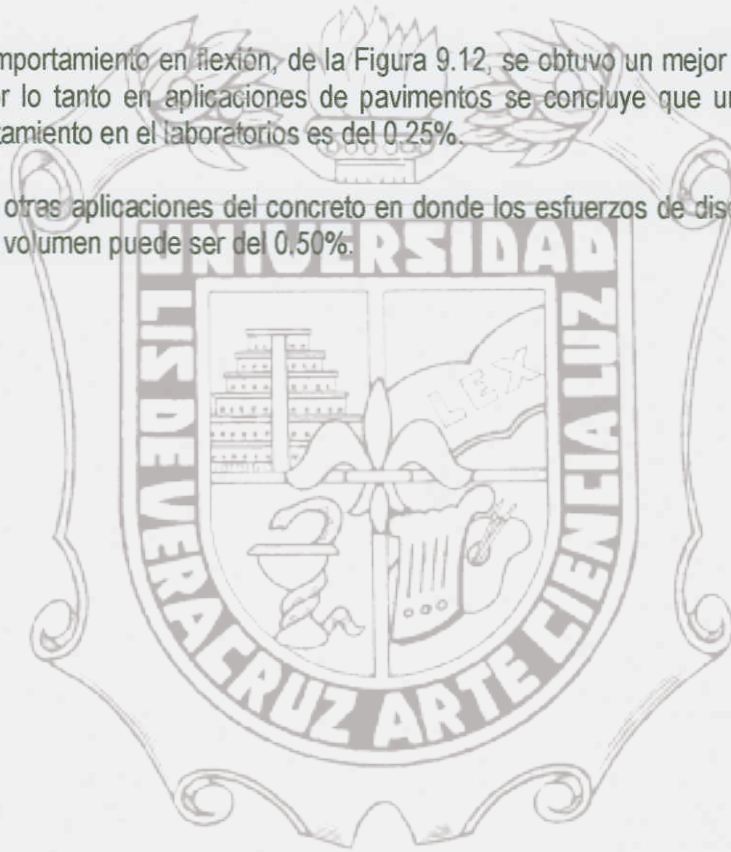
Finalmente, es importante destacar que no basta solamente con la adición de fibras PP al concreto para impedir la aparición de fisuras, también es importante llevar un cuidadoso control de calidad en cuanto a las técnicas de construcción, curado y terminado de las losas de concreto para pavimentos.

Bajo este criterio y mediante la fabricación de las curvas para graficar los resultados de los ensayos se ha concluido que el volumen óptimo de fibras es el comprendido entre el 0.25 y el 0.50% de fibras PP en peso al concreto.

Pues aún cuando en las pruebas de compresión los especímenes que tuvieron un mejor comportamiento fueron los que contenían el 0.50% de fibras, en la prueba de tensión indirecta a pesar de que a una temprana edad (7 días) el mejor comportamiento lo dio la muestra CF2, finalmente la mayor resistencia se obtuvo para la mezcla CF1 (0.25%) a los 28 días, esto se aprecia en la Figura 9.11.

En cuanto a su comportamiento en flexión, de la Figura 9.12, se obtuvo un mejor comportamiento para la mezcla CF1, por lo tanto en aplicaciones de pavimentos se concluye que un volumen óptimo de acuerdo al comportamiento en el laboratorio es del 0.25%.

Sin embargo, para otras aplicaciones del concreto en donde los esfuerzos de diseño estén regidos por la compresión este volumen puede ser del 0.50%.





CAPÍTULO 10. ANÁLISIS Y DISEÑO
ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Una manera de relacionar la información obtenida en el laboratorio es realizar dos diseños del mismo pavimento, uno con las propiedades de un concreto sin fibras y el otro con las propiedades del mismo concreto con la adición del porcentaje óptimo de fibras PP encontrado en el laboratorio.

Sin embargo, una vez realizado el diseño estructural habría que llevarlo a la práctica para evaluar su comportamiento, como este paso no se realizó durante el desarrollo de la investigación, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los pavimentos, lo que se hizo fue ligar un diseño base realizado por el método del PCA con modelos numéricos de simulación virtual en los que se buscó representar por medio de la computadora el comportamiento y los mecanismos de falla de un pavimento sometido a cargas de equipo portuario.

Es decir, el diseño por el método del PCA servirá como un “calibrador” para comparar los resultados del modelo de simulación y verificar que el diseño obtenido mediante el software se acerca a los patrones de comportamiento real de la estructura.

En este capítulo se realiza un diseño por el método del PCA para un *concreto sin fibras*, para lo cual se aplicaron los criterios de diseño descritos en el capítulo 2. Dicho diseño se tomó como un parámetro base para comparar los resultados obtenidos con el modelo de simulación.

10.1 Datos de diseño

a. Vehículo de diseño

Tal como se planteó en capítulos anteriores, se evaluará el comportamiento de un pavimento reforzado con fibras de polipropileno. Los parámetros para el diseño del mismo, se tomaron de las pruebas de laboratorio realizadas, y teniendo como vehículo de diseño un camión B2, cuyo peso máximo cargado es de 15.5 ton repartidos como se muestra en la Figura 10.1.

Figura 10.1. Características del vehículo de diseño.



Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacío
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.5
2	Sencillo	10	7
3			
4			
5			
SUMA		15.50	10.50

b. Datos generales

Vialidad en zona de patios de almacenamiento
 2 sentidos y doble carril
 Con apoyo lateral
 Módulo de ruptura del concreto (M_r) = 50.3 kg/cm²
 Módulo de sub-reacción del suelo (k) = 7 kg/cm²
 Base granular de 15 cms
 Factor de seguridad de carga = 1.2
 Datos de tráfico:

Periodo de diseño = 30 años
 Tasa de crecimiento anual del tráfico: 6.1%

10.2 Análisis del tráfico para conocer el número de repeticiones por eje

a) Tránsito Pesado Promedio Diario Anual

El método de la PCA descarta el tráfico ligero como los vehículos A' y A'2, sin embargo, para efectos de la investigación si se consideraron en el diseño, aún sabiendo que su impacto sería mínimo. Por lo que con las características del TPDA descritas anteriormente se obtuvo lo siguiente:

Tipo de vehículo	Total Diarios	% del TPDA	Cargados	Vacios
C2	572	100.0%	75%	25%
	572	100.0%		

Tabla 10.1. Tránsito promedio diario.

b) Factor de Sentido

Dado que los datos del aforo son en dos sentidos, entonces el factor de sentido a emplear será de 0.50.

c) Factor de Carril

En los datos generales del proyecto se mencionó que la vialidad cuenta con 2 carriles por sentido, así que para determinar el factor de carril a emplear se utilizó la Figura 1.5 entrando con el TPDA de 275 vehículos hasta encontrar la línea de 2 carriles en una dirección, de esta manera se obtuvo un 100% de vehículos circulando por el carril de la derecha; es decir un factor de carril de 1.0.

d) Factor de Crecimiento Anual

Para el cálculo del factor del crecimiento anual se empleó un periodo de diseño igual a 20 años y una tasa de crecimiento anual de 3.5%, lo cual sustituyendo en la fórmula (1.2) dió un factor de crecimiento anual de 1.41

e) Repeticiones esperadas para cada tipo de eje

Conociendo el tipo de vehículo y la cantidad de ellos (repeticiones esperadas) que van a circular sobre el pavimento, a continuación se obtuvieron las repeticiones para cada tipo de eje, es decir, para cada peso de eje (recordando que tenemos unos cargados y otros vacíos) y para cada tipo como lo son ejes sencillos, tándem ó tridem, este análisis se realizó de acuerdo a la fórmula (1.1), los resultados se muestran en la Tabla 10.1.

TPDA	572	Vehículos		Tasa crec. Anual	6.1%	FCR =	2.68
Vida útil	30	años	Fact. sentido	0.5	Fact. De carril	1	

Tipo de vehículo	Ejes cargados					Ejes vacíos				
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
C2	6,299,704.74	6,299,704.74				2,099,901.58	2,099,901.58			

Tabla 10.2. Número de repeticiones anuales por vehículo.

10.3 Cálculo del módulo de sub-reacción (K) de diseño

El valor de $k = 7 \text{ kg/cm}^2$ es del terreno natural y como se tiene una base granular de 15 cms, la k se modifica, resultando la k del conjunto suelo – sub base a un valor de 9.8 kg/cm^2 (10 kg/cm^2 para simplificar el ejemplo), de acuerdo a la Tabla A1.2.

10.4 Cálculo del espesor del pavimento

Los resultados de todas las repeticiones permisibles de todos los tipos de ejes y los totales de daño tanto por fatiga como por erosión, se muestran a continuación:

2da Parte. Planteamiento y desarrollo de la investigación

Proyecto:			
Espesor Inicial:	<u>15</u>	cm	Pasajuntas: <u>SI</u>
Base:	<u>GRANULAR</u>		
Módulo de reacción K:		kg/cm ²	Apoyo Lateral: <u>SI</u>
Módulo de ruptura, MR:	<u>50</u>	kg/cm ²	Periodo de diseño: <u>30</u> Años
Factor de seguridad:	<u>1.2</u>		Comentarios: _____

Carga del eje	Carga Pu	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Permisibles	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles	% de Daño
Ton	Ton		Fig.A.1		Fig.A.2	
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente 18.8
 9. Factor de relación de esfuerzos 0.38
 10. Factor de erosión 2.69

Ejes sencillos	Pu	Repeticiones esperadas				
3.00	3.6	2,099,902	0	0	0	0
3.50	4.2	2,099,902	0	0	0	0
5.50	6.6	6,299,705	0	0	100,000,000	0.062997047
10.00	12.0	6,299,705	100,000	62,997,047.43	280,000	22.49894551
Total				62,997,047.43	Total	22.56194256

Tabla 10.3. Diseño del pavimento por el método del PCA.

10.5 Resultados

Dado que los daños totales por fatiga y por erosión son ambos inferiores al 100%, el diseño es adecuado. Para llegar a este resultado, se realizaron previamente varios tanteos para revisar si los daños por fatiga y por erosión no sobrepasaran al 100%, es decir, se buscó optimizar el diseño del espesor, siendo el adecuado aquél espesor que provocara daños lo más cercano posible al 100% sin rebasarlo, tal y como se muestra en la Tabla 10.3.

Para poder establecer un criterio de diseño respecto a un pavimento rígido con un concreto reforzado con fibras, se evaluará mediante el modelo de simulación creando la máxima tensión que produce un eje simple de 10 t, en la placa, considerado la configuración de carga más desfavorable.

10.6 Cálculo del acero de refuerzo

a) Pasajuntas

Los pasajuntas se usan en las juntas transversales para transferir las cargas a las losas adyacentes. El esfuerzo y la deflexión en la junta son mucho más pequeños cuando las cargas son soportadas por dos losas que cuando es por una sola. El uso de pasajuntas puede minimizar las fallas de bombeo y la

diferencia de elevación de juntas, las cuales son consideradas por la PCA como factores importantes en el diseño de espesor.

De acuerdo a la Tabla 2.3 se necesitan pasajuntas de $\frac{3}{4}$ " de 41 cm de longitud @ 30 cm.

b) Modulación de las losas

Como la modulación de las losas está regida por las juntas transversales, las cuales a su vez están regidas por el espesor del pavimento, se tiene:

$$S = 24 D = 24 (12 \text{ cm}) = 288 \text{ cm}$$

Es decir, con esta regla práctica se supone que si se colocan juntas transversales a cada 2.88 m, no es necesaria la colocación del acero de refuerzo, sin embargo con la finalidad de hacer una modulación más uniforme en este caso se proponen tableros de 3.0 x 4.0 m, por lo que la relación de claro largo a corto es de 0.75, lo que también se encuentra dentro de la normatividad.

c) Acero para control del agrietamiento

Los pavimentos como en este caso que no requieren un acero de refuerzo estructural, sino que solamente requieren una cantidad mínima de acero para absorber la contracción generada por los esfuerzos de temperatura, se arma por medio de malla electrosoldada.

El trabajo de este acero es mantener las grietas cerradas y por ello se conoce como acero del control del agrietamiento. La cantidad de acero se calcula de acuerdo a la fórmula (2.2) como:

$$A_s = \frac{FLW}{2F_y}$$

$$A_s = \frac{1.5(4.0)(2,400)}{2(4,200)} = 1.71 \text{ cm}^2/\text{m}$$

De donde de la Tabla 2.4, por lo que es necesario la colocación de la malla electrosoldada 66 x 66.



CAPÍTULO 11. MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN DE LOSAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

11.1. Generalidades

En general las variables involucradas en el diseño de un pavimento son demasiadas, lo que complica la simulación de su comportamiento y es difícil obtener resultados satisfactorios mediante soluciones analíticas.

Gracias a los numerosos esfuerzos realizados por los investigadores a través de años para desarrollar modelos y métodos de ensayo que se acerquen cada vez más al comportamiento de los pavimentos para mejorar el análisis y el diseño, han existido avances.

La aproximación más utilizada para interpretar el comportamiento observado es analizar los esfuerzos y deformaciones teóricas de las capas del pavimento, obtenidos mediante algún software de diseño con los cuales se determinan los espesores de losa mínimos basados en los resultados de las cargas aplicadas.

El Método de Elemento Finito basado en la teoría de placas delgadas, ha adquirido mucho auge durante los últimos años debido a su simplicidad y a la disponibilidad de herramientas de cálculo por ordenador fáciles de utilizar, baratas de obtener y al mismo tiempo, sus resultados son bastante satisfactorios.

El método de cálculo generalmente supone que los materiales son elásticos, homogéneos e isotrópicos, sometidos a cargas estáticas en un sistema multicapa en el que las capas son infinitas en dos dimensiones y finitas en espesor.

Esto a pesar de que es conocido y comprendido en la ingeniería de pavimentos que los materiales granulares y los suelos que forman la explanada (o cimiento) presentan un comportamiento no lineal (las deformaciones y esfuerzos son función del valor de las solicitaciones) en el rango normal de las cargas de tráfico; lo que significa que existen “pequeñas variaciones” entre las consideraciones del modelo y la realidad del sistema.

El modelo numérico que se realizó con ayuda del programa RAM Advanse contiene estas variaciones ya que el software maneja el comportamiento lineal de los materiales. Sin embargo, para acercarlo lo más posible al modelo a un diseño clásico se compararon los resultados del software con el diseño realizado por el método del PCA, y adicionalmente se vincularon los resultados software con los del concreto reforzado con fibras PP obtenidos en el laboratorio.

Con esto, la investigación pretende sentar las bases de cómo se comportan los pavimentos reforzados con fibras, ante las cargas aplicadas, y conocer hasta qué punto estos pavimentos puedan absorber y redistribuir las cargas.

La fase inicial fue la elaboración del modelo de computadora con el método de elementos finitos, para que reflejara el comportamiento de un pavimento reforzado con refuerzo tradicional para un vehículo A'2. A continuación se fue ajustando hasta que proporcionó un resultado acorde a los valores de diseño por el método de PCA realizado en el capítulo anterior.

Se modeló un sistema estructural como un grupo de losas de concreto sometidas a las mismas cargas actuantes que el pavimento analizado en el capítulo anterior por el método del PCA.

Posteriormente se añadieron a las propiedades del concreto los datos obtenidos en el laboratorio para un concreto con fibras correspondientes a la mezcla CF1. Se tomaron los resultados más representativos para comparar el comportamiento del pavimento ante tráfico ligero y pesado, para evaluar la posibilidad de sustitución de la malla electrosoldada por un refuerzo con fibras PP.

11.2. Consideraciones básicas del Método del PCA

Para poder realizar el nuevo modelo de comportamiento fue necesario conocer los criterios de diseño del método del PCA para poder realizar los ajustes pertinentes al nuevo modelo por evaluar; algunos de los cuales se describen a continuación.

11.2.1 Dimensionamiento

El método de PCA fue desarrollado interpretando los resultados de un modelo de elementos finitos basado en el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (4.50 x 3.65 metros) a la cuál se le aplicaron cargas al centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte.

En comparación el nuevo modelo numérico se realizó discretizando no solamente una, sino varias losas, con el deseo de representar la transferencia de carga entre las juntas. Para tal efecto las dimensiones de las losas fueron de 3.0 m x 4.0 m.

Después de analizar diferentes posiciones de los ejes de la losa, quienes diseñaron el método del PCA encontraron que la posición crítica es para 2 casos:

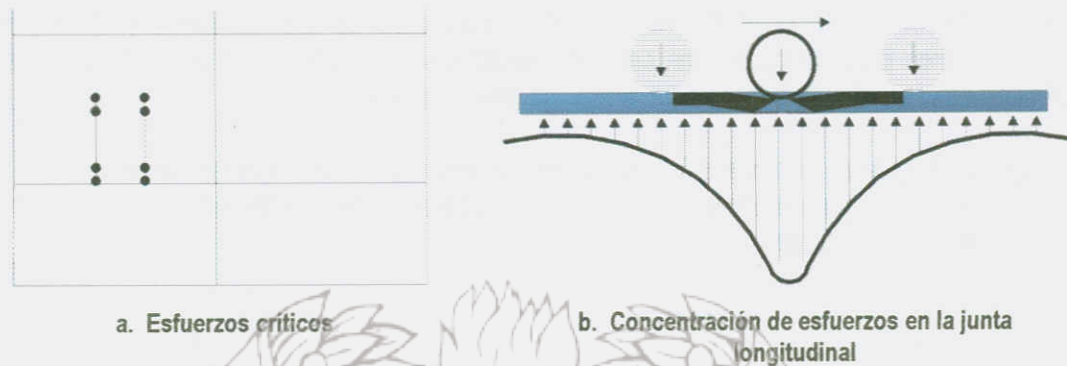
a) Esfuerzos críticos²⁸

Los esfuerzos críticos en el pavimento ocurren cuándo el camión es colocado cerca ó sobre los bordes del pavimento y a la mitad de las juntas transversales.

Dado que las juntas se encuentran a la misma distancia de esta ubicación, el espaciamiento de las juntas transversales y el tipo de transferencia de carga tienen muy poco efecto en la magnitud de los esfuerzos.

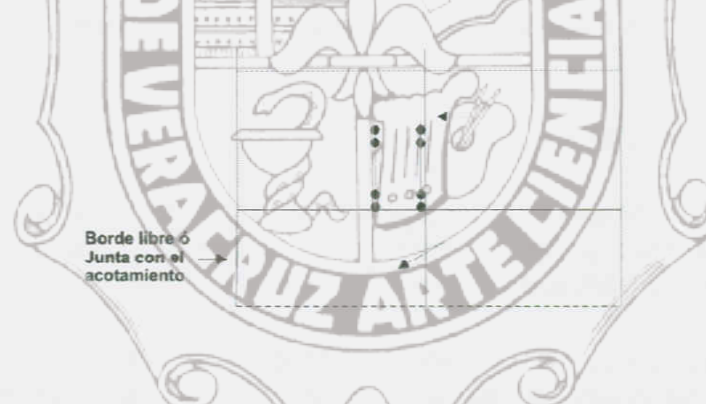
La Figura 11.2 permite tener una visión del estado de la estructura de un pavimento rígido y de sus losas ante el paso de un vehículo en sentido longitudinal al momento de llegar a la junta. En este caso ocurre una concentración de esfuerzos (borde de ambas losas) por la ausencia de continuidad de la capa de rodadura, cuya distribución se puede representar en forma de campana invertida.

Figura 11.1. Posición de las cargas que provocan los esfuerzos críticos.

b) Deformaciones críticas²⁸

Las deformaciones más críticas del pavimento ocurren en las esquinas de las losas cuando una carga es colocada sobre la junta con las ruedas cerca ó sobre la esquina

Figura 11.2. Posición de las cargas que provocan las deformaciones críticas.



En esta situación, el espaciamiento de las juntas transversales no tiene efecto en la magnitud de las deformaciones en las esquinas pero el mecanismo de transferencia de carga si tiene un gran efecto.

11.2.3 Ubicación de las cargas

Las bases de diseño del método del PCA indican que las cargas de los camiones ubicados en el borde exterior del pavimento provocan las condiciones más severas que cualquier otra ubicación de las cargas. Si esta ubicación del camión se mueve unos cuantos centímetros al interior del pavimento, el efecto decrece substancialmente.

Finalmente en la práctica de ingeniería de pavimentos se sabe que solamente una pequeña fracción de todos los camiones circulan con sus llantas exteriores sobre los bordes del pavimento y que la mayoría de ellos se ubican circulando con sus llantas exteriores aproximadamente a una distancia de 60

centímetros del borde del pavimento. Por lo que el método del PCA considera que el 6% de los camiones que circularán por el pavimento lo harán por el borde.

La información sobre la distribución de las ubicaciones de los camiones y de los esfuerzos y deformaciones provocados por las cargas colocadas sobre o cerca del borde del pavimento es muy difícil de emplear directamente en un procedimiento de diseño.

Sin embargo, gracias al modelo 3D se han podido eliminar las limitaciones de muchos de los antiguos modelos de dos dimensiones para estudiar correctamente los efectos en las zonas de borde de los pavimentos y en las juntas.

11.3. Modelación del sistema

Como aún subsiste la discusión sobre la aplicabilidad de los modelos teóricos y la necesidad de desarrollar modelos matemáticos menos complejos para el diseño de pavimentos, es la línea de investigación que sigue la tesis, por lo cual se recurrió al empleo del programa RAM advance y al tradicional método del PCA, buscando realizar un modelo matemático representativo del comportamiento de los pavimentos reforzados con fibras de polipropileno.

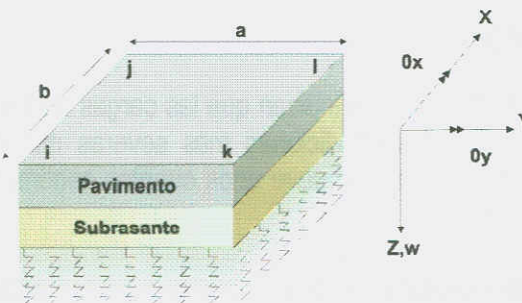
La modelación del sistema se basó en los parámetros del concreto fibroreforzado obtenidos en el laboratorio.

11.3.1 Modelo de la capa de apoyo

Como soporte para el proyecto de investigación, se tomó como base para construir el modelo el propuesto por Westergaard, por lo que consideró el firme rígido como un elemento placa de superficie y espesor finitos sobre una base elástica representada por fundaciones Winkler.

Es decir, se realizó una pequeña modificación al modelo de Westergaard²⁹, el cual supone una losa de concreto de superficie infinita, apoyada sobre un suelo homogéneo y que soporta cargas verticales repartidas. Esta teoría ha sido ampliamente usada a pesar de que asumen la hipótesis de losa infinita.

Figura 11.3. Elemento placa usado por el RAM Advance.



La adaptación de este modelo permitió obtener diferentes soluciones para el diseño de pavimentos de concreto, sometidos a diversos tipos de tráfico.

Para la modelación de la sub-rasante y la sub-base se empleó la rigidez del suelo. La sub-rasante se modeló como una capa de resortes uniformes que permite deformaciones, de acuerdo a las condiciones de carga que se apliquen.

Para modelar la losa se emplearon parámetros que se establecieron como variables, tal es el caso de la resistencia del concreto y el módulo de ruptura, cuyos valores se determinaron con anterioridad en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

El pavimento se modeló como un elemento placa con cuatro nodos y tres grados de libertad por nodo, es decir, un total de doce grados de libertad.

Existen tres grados de libertad en cada nodo:

- En z (w), que corresponde a un grado de libertad lineal se refiere al asentamiento que puede permitirse al pavimento.
- La rotación en torno al eje X (θ_x), representada por un grado de libertad angular.
- La rotación en torno al eje Y (θ_y), representada por un grado de libertad angular.

La transferencia de carga de los equipos al pavimento se simuló con una articulación de manera que el elemento puede transmitir cortante, pero no transmite momento.

Finalmente, los criterios empleados para modelar el sistema se pueden resumir como:

- Teoría elástica con pequeñas deformaciones, placa de espesor medio y homogéneo para la losa de concreto
- La capa es gruesa para tomar esfuerzos de flexión, pero no tan gruesa para que los esfuerzos de corte sean importantes
- Asimismo, se asume que la línea normal a la superficie media sin deformar, permanece normal a la superficie media de la placa deformada
- El modelo está sometido a esfuerzo plano
- Las barras de transferencia son articulaciones y están ubicadas en el eje neutro de la losa

Con el propósito de establecer las dimensiones de los modelos, se consideraron, el nivel de carga que se debería aplicar en función del tipo de vehículo estándar, el tipo de subrasante y subbase; además de la clase de tráfico.

11.3.2 Modulación de las losas

La modulación de losas se refiere a definir la forma que tendrán los tableros de losas del pavimento. Esta forma se da en base a las dimensiones de tableros, o dicho de otra forma, a la separación entre juntas tanto transversales como longitudinales.

La modulación de losas esta regida por la separación de las juntas transversales que a su vez depende del espesor del pavimento, tal como se mencionó en el apartado 3.5 de este estudio.

La otra dimensión que tiene que ver con la modulación de losas es la separación de juntas longitudinales, sin embargo esta está referenciada a la forma de los tableros de losas.

La forma ideal de un tablero de losa es la cuadrada, sin embargo no siempre es posible y conveniente tener las losas perfectamente cuadradas, por lo que nos vemos obligados a considerar un cierto grado de rectangularidad. La relación entre largo y ancho de un tablero de losas no deberá estar fuera de estos limites: 0.71 a 1.4.



11.4. Uso de la superficie y análisis de cargas

a. Análisis de cargas

Existen aspectos que necesitan reflejarse en el modelo del pavimento, como es la aplicación de la carga. El análisis estático de la carga es el más comúnmente empleado para el dimensionamiento de pavimentos.

Esta hipótesis es válida para aparcamientos, plataformas, puertos y zonas de almacenamiento como lo es el caso de esta investigación, pero en la mayoría de pavimentos de carreteras las cargas normales son móviles, por lo que serían muchos más adecuados modelos de cargas dinámicas.

Como la finalidad de este estudio esta enfocado a pavimentos portuarios podemos asegurar que el análisis estático de la carga es representativo, ya que en caso de las vialidades en el interior de un puerto, los vehiculos tienen que circular a velocidades muy restringidas.

Para esto, a efectos de pavimentación se han considerado 5 de los vehiculos tipo que más inciden en la Terminal portuaria.


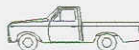

Tipo de vehículos				
Nomenclatura	No. de ejes	No. De llantas	Tipo de tráfico	Configuración del vehículo
A2	2	4	Ligero	
A'2	2	4	Ligero	
C2	2	6	Pesado	

Tabla 11.1. Tipos de vehículos de diseño.

En general, los pavimentos representan una inversión aproximada del 30% del total en una Terminal, lo que exige requerimientos estrictos en cuanto a las cargas que deben soportar y a las velocidades de los equipos de manipulación, que cada vez son más complejos, de mayores dimensiones y por lo tanto de mayor peso.

Por lo que en el puerto de Veracruz, los procesos constructivos tienen altas exigencias como se ha mencionado anteriormente, de ahí el motivo de la investigación, la cual se ha enfocado a incrementar la durabilidad del pavimento y reducir los futuros costos de mantenimiento.

La modelación de las cargas se realizó en base al Manual de Dimensionamiento Portuario y a las características de los vehículos de diseño de acuerdo al Manual de Diseño Geométrico de la SCT. Las descargas por ejes de los vehículos de diseño se muestran a continuación.

Figura 11.5. Cargas en vehículos de diseño de tráfico ligero.

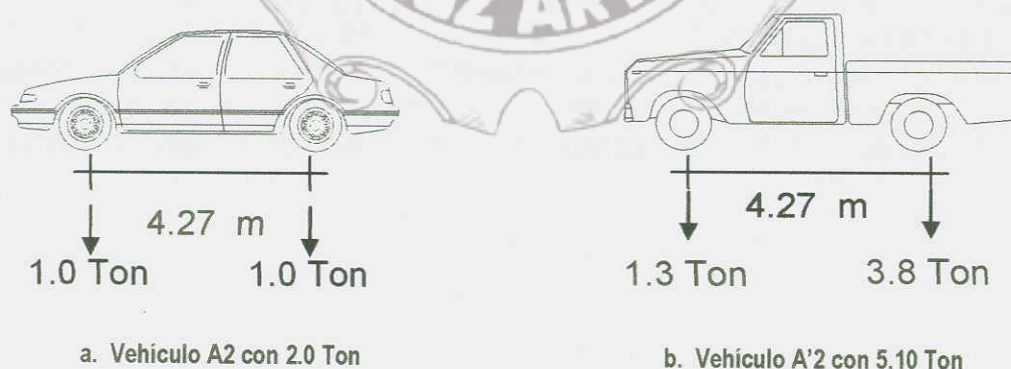
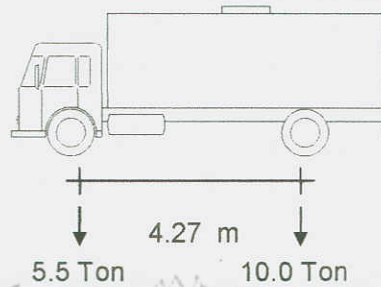


Figura 11.6. Cargas en vehículos de diseño de tráfico pesado.



a. Vehículo C2 con 15.50 Ton

b. Determinación de bases y sub-bases

El modelo más común para representar una base o sub-base en un pavimento, que considera una relación lineal esfuerzo-deformación del suelo es el modelo Winkler, en el cual se sustituye al suelo por una cama de resortes cada uno de los cuales actúa independiente de los demás.

Se considera que la presión con que reacciona el suelo ante la carga transmitida sobre la cimentación es proporcional al hundimiento que esta presenta. El *módulo de reacción* es la constante de proporcionalidad, con la relación:

$$p = k_s y \quad (11.1)$$

En donde p es la presión (carga por unidad de área) ejercida sobre la cimentación, y " y " el asentamiento en el punto considerado, sin embargo, una debilidad del modelo es suponer que el hundimiento del suelo es proporcional a la presión ejercida e independiente del área cargada, lo cual no ocurre en la realidad, ya que el hundimiento aumenta en forma proporcional al área cargada. Además este efecto, en las arenas es mucho menos acentuado que en las arcillas, por lo que para corregir el módulo de reacción y aplicarlo a un área cuadrada cualquiera se aplica la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{k_{s1}}{B}, \text{ para arcillas} \quad (11.2)$$

$$K_s = k_{s1} \left(\frac{B+1}{2B} \right)^2 > 0.25, \text{ para arenas} \quad (11.3)$$

En donde:

K_s = Módulo de reacción para la placa (unitario)

B = Ancho del cimiento (pies)

Una variante del procedimiento anterior es considerar, en lugar de una cama de resortes continuos, una serie de resortes discretos colocados debajo de los puntos de aplicación de las cargas. Estos resortes representan la rigidez del suelo, definida como la carga concentrada que es necesario aplicar en el punto en cuestión para tener en el suelo un asentamiento unitario. Esta rigidez se determina de la igualdad:

$$\frac{P}{k} = y = \frac{p}{Ak_{s1}}$$

Por lo tanto:

$$K = A k_{s1} \quad (11.4)$$

De donde:

A = Área del cimiento que es tributaria de la carga concentrada P
 k_{s1} = Módulo de reacción para la placa (unitario)

A partir de estas consideraciones, y para el ejemplo anterior analizado por el método del PCA, se modeló la cimentación para un $k_{s1} = 10 \text{ kg/cm}^3$, para analizarse por procedimientos elásticos usuales del análisis estructural.

11.5. Análisis Estructural

11.5.1. Generalidades

En este estudio, a través del uso del programa RAM Advance, se revisaron los resultados de la modelación de losas de concreto sometidas a cargas móviles de vehículos de magnitudes previamente determinadas.

En un inicio se tomó la decisión de interpretar el comportamiento de los pavimentos a partir de las variables de estudio para cada uno de los colectivos de la investigación, descritas en el apartado 6.6.

De esta forma, se llegó a la parte del análisis estructural, para el sistema las variables de estudio fueron:

- Variable 1: Tipo de tráfico
- Variable 2: Los momentos máximos en las placas
- Variable 3: El refuerzo de la losa
- Variable 4: Los esfuerzos en la placa

Se tomaron como datos de entrada, el apoyo del suelo (K), los valores de las cargas correspondientes a cada vehículo tipo y las condiciones de apoyo de las losas entre las juntas, creyendo de esta forma que la investigación se aproxima a un mayor nivel de concreción sobre la realidad del problema objeto de estudio, evitando incluir variables que no forman parte de la realidad del fenómeno de investigación.

Se realizaron tres modelos correspondientes a las cargas de los vehículos:

Caso 1: A2	Vehículos Ligeros
Caso 2: A'2	Vehículos Ligeros
Caso 3: C2	Vehículos Pesados

El diseño propone una solución aproximada. El análisis original se realizó en el supuesto del empleo de un concreto "sin fibras", para posteriormente evaluar el comportamiento del mismo pavimento con fibras, y así se determinó cuales son los casos en los que se puede sustituir el uso del acero por las fibras PP.

11.5.2. Modelo de la base

Para un módulo de reacción $k_{s1} = 10 \text{ kg/cm}^3$, bajo el supuesto de tener un material granular de base de 15 cm de espesor, se realizó la siguiente corrección bajo el empleo de losas de 3.0 x 4.0 m, es decir, una avenida de 6.0 m de ancho, empleando la ecuación 11.3.

$$K_s = k_{s1} \left(\frac{B+1}{2B} \right)^2 > 0.25, \text{ para arenas}$$

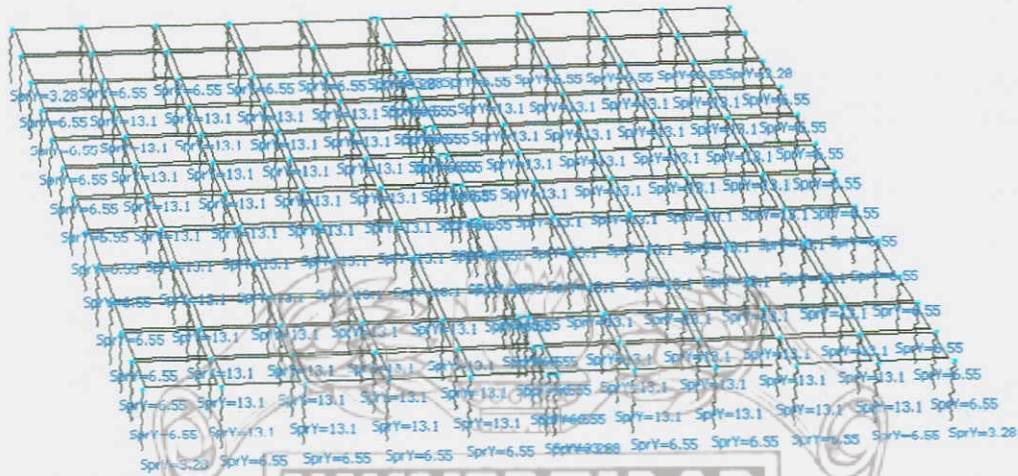
Por lo tanto 3.0 m = 10 pies, se sustituyó en la fórmula y se obtuvo:

$$K_s = 10 \left(\frac{10+1}{2(10)} \right)^2 = 3.02 \text{ Kg/cm}^3$$

Como cada placa en el modelo tiene un área de 4331 cm², se obtuvo de acuerdo a la ecuación 11.4 lo siguiente:

$$K = (3.02 \text{ Kg/cm}^3) (4,331 \text{ cm}^2) = 13,101.3 \text{ Kg/cm} = 13.1 \text{ Ton/cm}$$

Figura 11.7. Modelo del suelo.



11.5.3. Análisis de cargas

Para efectos de diseño del pavimento se analizaron tres casos, en cada uno de los cuales se variaron las cargas de diseño en función del vehículo tipo que se consideró podía acceder a una Terminal Portuaria.

a. Vehículo tipo A2

Cargas por ejes. Automóvil

Eje delantero 1.00 ton
Eje posterior 1.00 ton

Peso total 2.0 ton del vehículo

b. Vehículo tipo A'2

Cargas por ejes. Camioneta

Eje delantero 1.30 ton
Eje posterior 3.80 ton

Peso total 5.10 ton del vehículo

c. Vehículo tipo C2

Cargas por ejes. Camión

Eje delantero 5.50 ton
Eje posterior 10.00 ton

Peso total 15.0 ton del vehículo

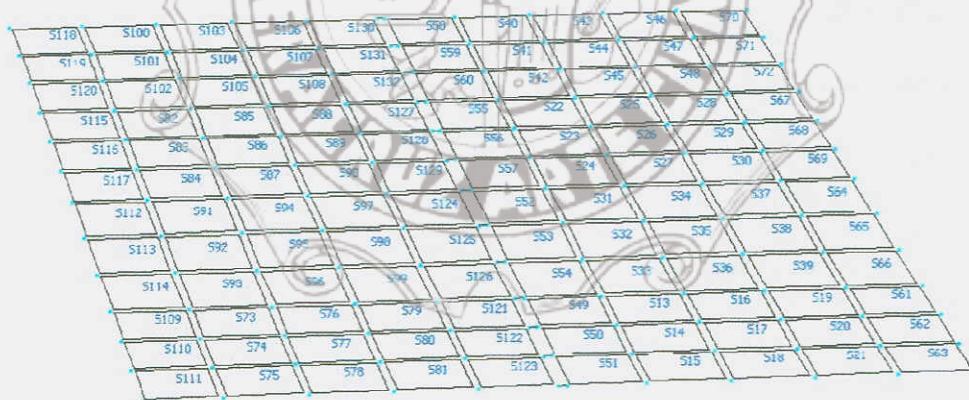
11.5.4. Modelo tridimensional

Una vez determinadas las cargas que se impondrían sobre la estructura, se introdujeron los datos al programa para obtener los elementos mecánicos de cada elemento de la estructura.

Los datos de la geometría de la estructura a través del programa se encuentran desglosados en el Anexo 6.

Para lo cual, se creó un modelo del pavimento a base de elementos placa (Figura 11.8) para obtener las deformaciones y esfuerzos máximos impuestos sobre la losa del pavimento.

Figura 11.8. Elementos placa.



A este modelo se le introdujeron elementos barra, con la finalidad de representar el efecto de los pasadores ante las juntas para la transferencia de esfuerzos entre dos losas adyacentes, tal y como se muestra en la Figura 11.9.

Para la realización del modelo, tal como se explicó anteriormente, se consideraron tableros separados por juntas de 2 cm, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11.9. Modelo que incluye juntas y pasadores.



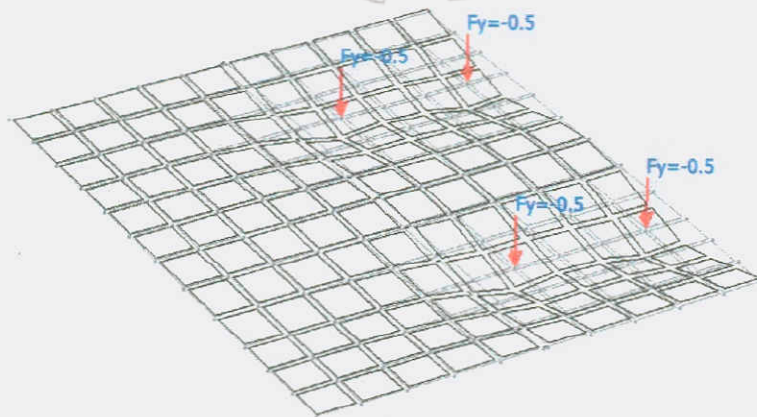
11.5.5. Introducción de las fuerzas

a. Vehículo tipo A2

Fuerzas sobre nudos

Estado	Nudo	FX [Ton]	FY [Ton]	FZ [Ton]	MX [Ton*M]	MY [Ton*M]	MZ [Ton*M]
CV	7	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00 <td 0.00	
	14	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 11.10. Deformada debida a la Carga viva en vehiculo A2.

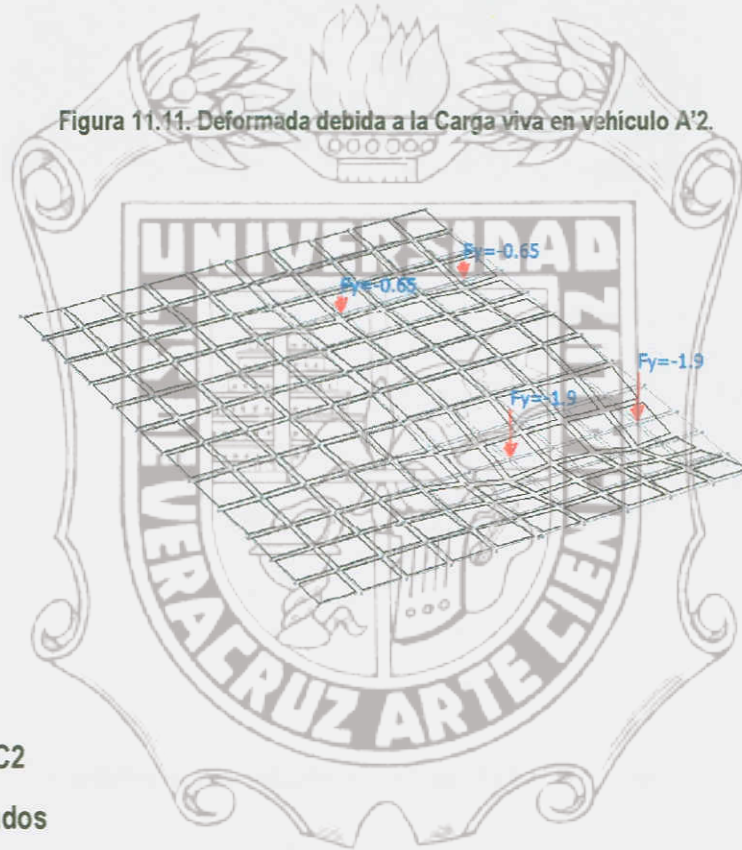


b. Vehículo tipo A'2

Fuerzas sobre nudos

Estado	Nudo	FX [Ton]	FY [Ton]	FZ [Ton]	MX [Ton*M]	MY [Ton*M]	MZ [Ton*M]
CV	7	0.00	-0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.00	-1.90	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	0.00	-0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
	14	0.00	-1.90	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 11.11. Deformada debida a la Carga viva en vehiculo A'2.

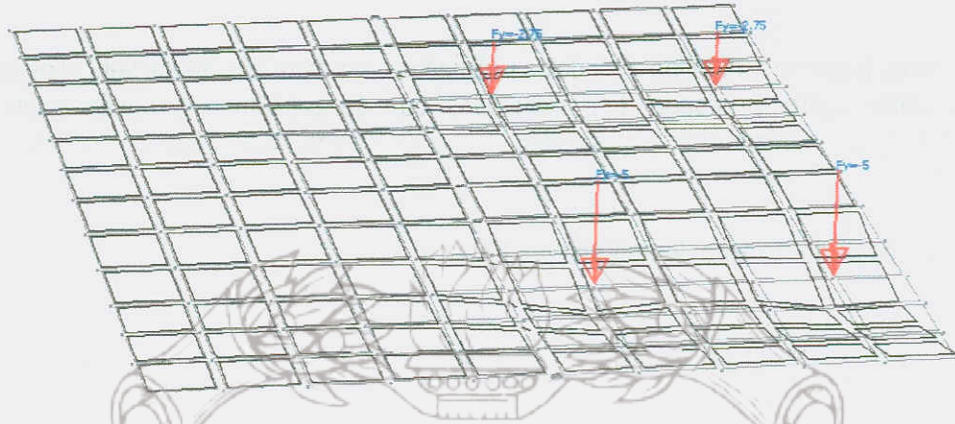


c. Vehículo tipo C2

Fuerzas sobre nudos

Estado	Nudo	FX [Ton]	FY [Ton]	FZ [Ton]	MX [Ton*M]	MY [Ton*M]	MZ [Ton*M]
CV	7	0.00	-2.75	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.00	-5.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	0.00	-2.75	0.00	0.00	0.00	0.00
	14	0.00	-5.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 11.12. Deformada debida a la Carga viva en vehiculo C2.



11.5.6. Estados de cargas

NOMENCLATURA

Comb : Indica si la carga es una combinación (1= es combinación, 0 = es condición de carga)

Estados de carga

Estado	Descripción	Comb.	Categoría
pp	Peso Propio	0	DL
cv	carga viva	0	LL
c1	1.4PP+1.7CV	1	
c2	PP+CV	1	

Multiplicadores de peso propio para Estados de carga

Estado	Descripción	Multiplicador Peso Propio			
		Comb.	MultX	MultY	MultZ
pp	Peso Propio	0	0.00	-1.00	0.00
cv	carga viva	0	0.00	0.00	0.00
c1	1.4PP+1.7CV	1	0.00	0.00	0.00

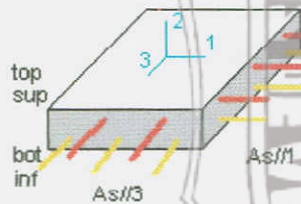
11.6. Diseño estructural tradicional

Se tomó como base de partida los 3 modelos realizados para cada uno de los vehículos tipo, los cuales abarcan tráfico ligero y pesado. Los resultados que se presentan a continuación corresponde únicamente a pavimentos con un concreto $f_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$, sin ninguna inclusión de fibras de polipropileno.

Diseño de placas de HoAo a flexión en ejes locales

Notas:

- Se ha adoptado la norma ACI 318.99 para el diseño
- Los esfuerzos de membrana y los momentos torsores son ignorados en el diseño
- "Inf" es la cara inferior de la placa (-t/2)
- "Sup" es la cara superior de la placa (+t/2)
- ec, es el estado de carga crítico
- Momentos positivos crean tensión en -t/2, compresión en +t/2
- Un resultado de 1E20 en el área significa que la sección es insuficiente para resistir las sollicitaciones aplicadas
- Se ha adoptado la cuantía mínima especificada por norma (7.12.2.1)



Estados de carga que intervienen en el diseño:

a. Vehículo tipo A2

Del análisis realizado se obtuvo que el momento máximo se presentó en la placa No.13, con un valor de 0.19 Ton-m, para lo cual se requiere un área de acero de 0.42 cm^2 .

SHELL 13

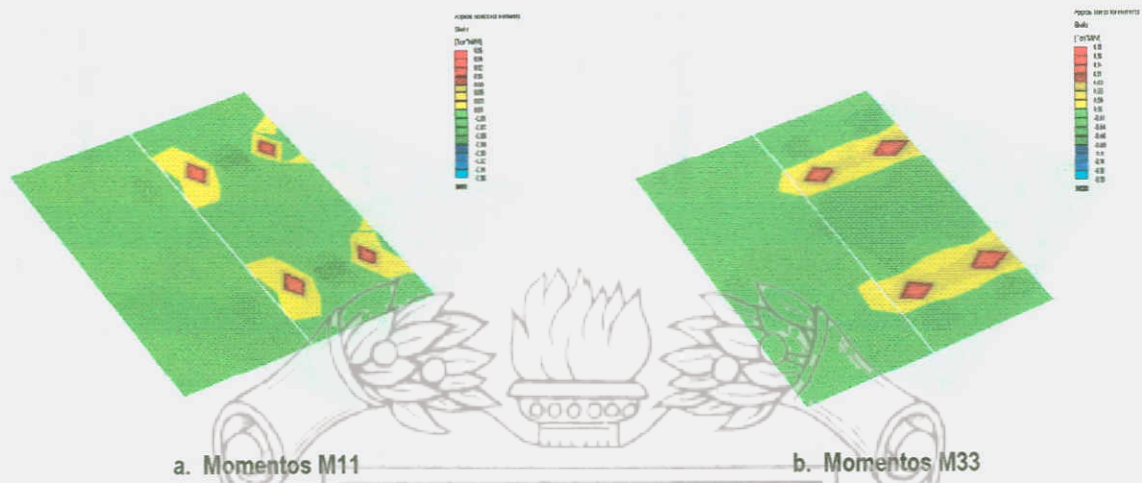
Thickness = 15.00[cm]

Mechanical cover = 5.00[cm]

Node	As parallel to Z			As parallel to X					
		Mxx [Ton*M/M]	lc		Asz [cm ² /M]	Mzz [Ton*M/M]	lc	Asx [cm ² /M]	
14	Min.	0.16	c1	Top	0	0.19	c1	Top	0
	Max.	0.16	c1	Bot	0.36	0.19	c1	Bot	0.42
26	Min.	0.03	c1	Top	0	-0.05	c1	Top	0.11
	Max.	0.03	c1	Bot	0.06	-0.05	c1	Bot	0
27	Min.	-0.07	c1	Top	0.15	0.05	c1	Top	0
	Max.	-0.07	c1	Bot	0	0.05	c1	Bot	0.11
28	Min.	0	c1	Top	0	0.02	c1	Top	0
	Max.	0	c1	Bot	0	0.02	c1	Bot	0.04

Tabla 11.2. Momentos máximos en pavimento con vehículo A2.

Figura 11.13. Momentos máximos debidos al vehículo A2.



Por lo tanto para un vehículo A2, el pavimento deberá tener el siguiente armado:

Usar una malla electrosoldada 6x6-10/10 ($A_s = 0.61 \text{ cm}^2/\text{m}$)

b. Vehículo tipo A'2

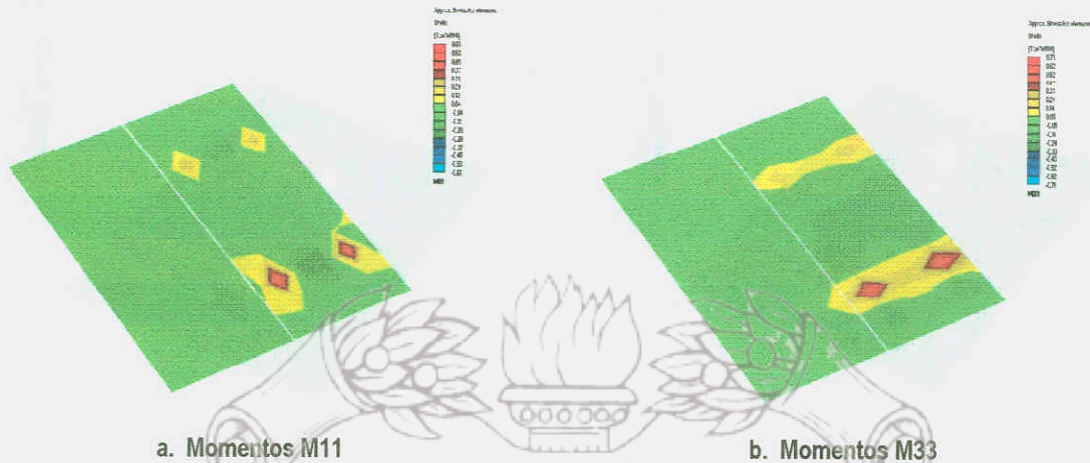
Del análisis realizado se obtuvo que el momento máximo se presentó en la placa No.13, con un valor de 0.71 Ton-m, para lo cual se requiere un área de acero de 1.62 cm^2 .

SHELL 13
 Thickness = 15.00[cm]
 Mechanical cover = 5.00[cm]

Node		As parallel to Z		As parallel to X		lc		Asx
		Mxx [Ton*M/M]	lc	Asz [cm ² /M]	Mzz [Ton*M/M]			
14	Min.	0.61	c1 Top	0	0.71	c1	Top	0
	Max.	0.61	c1 Bot	1.39	0.71	c1	Bot	1.62
26	Min.	0.11	c1 Top	0	-0.17	c1	Top	0.37
	Max.	0.11	c1 Bot	0.24	-0.17	c1	Bot	0
27	Min.	-0.27	c1 Top	0.59	0.17	c1	Top	0
	Max.	-0.27	c1 Bot	0	0.17	c1	Bot	0.39
28	Min.	0	c1 Top	0	0.09	c1	Top	0
	Max.	0	c1 Bot	0	0.09	c1	Bot	0.2

Tabla 11.3. Momentos máximos en pavimento con vehículo A'2.

Figura 11.14. Momentos máximos debidos al vehículo A'2.



Por lo tanto para un vehículo A'2, el pavimento deberá tener el siguiente armado:

Usar una malla electrosoldada 6x6-04/04 ($A_s = 1.68 \text{ cm}^2/\text{m}$)

c. Vehículo tipo C2

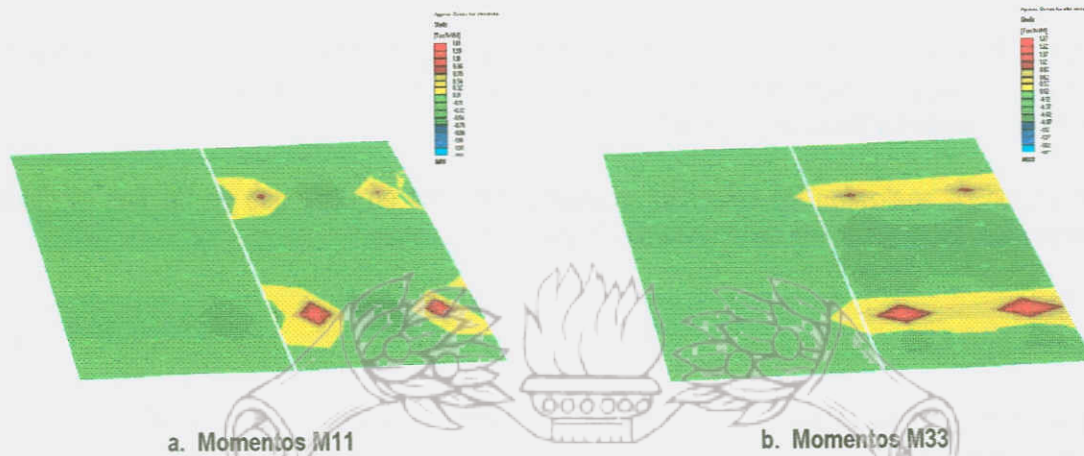
Del análisis realizado se obtuvo que el momento máximo se presentó en la placa No.13, con un valor de 1.88 Ton-m, para lo cual se requiere un área de acero de 4.41 cm^2 .

SHELL 13
 Thickness = 15.00[cm]
 Mechanical cover = 5.00[cm]

Node		As parallel to Z			As parallel to X			Asx [cm^2/M]	
		Mxx [Ton*M/M]	lc	Top/Bot	Asz [cm^2/M]	Mzz [Ton*M/M]	lc		Top/Bot
14	Min.	1.62	c1	Top	0	1.88	c1	Top	0
	Max.	1.62	c1	Bot	3.76	1.88	c1	Bot	4.41
26	Min.	0.28	c1	Top	0	-0.43	c1	Top	0.96
	Max.	0.28	c1	Bot	0.63	-0.43	c1	Bot	0
27	Min.	-0.7	c1	Top	1.59	0.46	c1	Top	0
	Max.	-0.7	c1	Bot	0	0.46	c1	Bot	1.04
28	Min.	0	c1	Top	0	0.25	c1	Top	0
	Max.	0	c1	Bot	0.01	0.25	c1	Bot	0.56

Tabla 11.4. Momentos máximos en pavimento con vehículo C2.

Figura 11.15. Momentos máximos debidos al vehículo C2.



a. Momentos M11

b. Momentos M33

Por lo tanto para un vehículo C2, el pavimento deberá tener el siguiente armado:

Usar Vs. No.3 $as = 0.71 \text{ cm}^2$, para $B = 100 \text{ cm}$

Sep = $B \text{ as} / As$

Sep = $100 \times 0.71 / 4.41 = 16 \text{ cm}$

11.7. Análisis de sustitución del acero por fibras PP

Una vez que se analizó el pavimento y se determinó su comportamiento ante las diferentes cargas a las que se sometió, la evaluación sobre la posibilidad de sustituir total o parcialmente el acero de refuerzo se realizó en función de los esfuerzos obtenidos a través del análisis estructural.

Para ello, inicialmente se debe conocer lo que indica la normatividad del RDF en las NTC, lo cual se muestra a continuación:

Para una losa de peralte $h = 15 \text{ cm}$

$f_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

$f^*c = 0.8 f_c = 0.8 (250 \text{ Kg/cm}^2) = 200 \text{ Kg/cm}^2$

De acuerdo a las normas NTC 1.5.13

Esfuerzo Admisible del Concreto = $1.2 \sqrt{f^*c} = 1.2 \sqrt{200} = 16.97 \text{ kg/cm}^2$ (sin armado)

Esfuerzo Admisible Fibra de Polipropileno = 10 kg/cm^2

Esfuerzo Admisible Total = 26.97 kg/cm²

Por lo tanto, de aquí es posible deducir que si el esfuerzo actuante en las losas de los pavimentos es menor que 26.97 kg/cm², existe la factibilidad de sustituir el acero de refuerzo por un refuerzo tridimensional a base de fibras de polipropileno.

A continuación se analizaron los esfuerzos máximos obtenidos en cada uno de los tres modelos de simulación realizados, de donde se obtuvieron algunas conclusiones.

a. Vehículo tipo A2

Para el análisis realizado para el modelo número tres, se obtuvieron los esfuerzos máximos tal como se indica en la Tabla 11.5.

SHELL 13

Node		Sigma Max [Ton/cm ²]	Sigma Min [Ton/cm ²]	Tau Max [Ton/cm ²]	Angle [°]	Von Mises [Ton/cm ²]
Condition c1=1.4d+1.7cv						
14	(+t/2)	0	-0.01	0	73.95	0 (*)
	(-t/2)	-0.01	0	0	-16.05	0
26	(+t/2)	0	0	0	11.5	0
	(-t/2)	0	0	0	-78.5	0
27	(+t/2)	0	0	0	83.35	0
	(-t/2)	0	0	0	-6.65	0
28	(+t/2)	0	0	0	57.5	0
	(-t/2)	0	0	0	-32.5	0

(*) Nota: El programa da resultados de esfuerzos igual a 0, por las unidades empleadas. Sin embargo, convirtiendolas a Kg/cm², se tiene un esfuerzo mínimo de 5.1 Kg/cm².

Tabla 11.5. Esfuerzos maximos en pavimento con vehículo A2.

Por lo tanto se observa que el máximo esfuerzo actuante es de 5.1 kg/cm², si con la fibra y el concreto es posible absorber 26.97 kg/cm², en este caso es posible eliminar a través del uso de las fibras PP, el refuerzo a base de malla electrosoldada.

b. Vehículo tipo A'2

Para el análisis realizado para el modelo número tres, se obtuvieron los esfuerzos máximos tal como se indica en la Tabla 11.6.

SHELL 13

Node		Sigma Max [Ton/cm ²]	Sigma Min [Ton/cm ²]	Tau Max [Ton/cm ²]	Angle [°]	Von Mises [Ton/cm ²]
Condition c1=1.4d +1.7cv						
14	(+t/2)	-0.02	-0.02	0	74.07	-0.02
	(-t/2)	0.02	0.02	0	-15.93	0.02
26	(+t/2)	0	0	0	12.04	-0.01
	(-t/2)	0	0	0	-77.96	0.01
27	(+t/2)	0.01	0	0.01	83.42	-0.01
	(-t/2)	0	-0.01	0.01	-6.58	0.01
28	(+t/2)	0	0	0	60.43	0
	(-t/2)	0	0	0	-29.57	0

Tabla 11.6. Esfuerzos máximos en pavimento con vehículo A'2.

Por lo tanto se observa que el máximo esfuerzo actuante es de 20 kg/cm², si con la fibra y el concreto es posible absorber 26.97 kg/cm², en este caso es posible eliminar a través del uso de las fibras PP, el refuerzo a base de malla electrosoldada.

c. Vehículo tipo C2

Para el análisis realizado para el modelo número tres, se obtuvieron los esfuerzos máximos en la placa No.13, del modelo, con un valor como se indica en la Tabla 11.7.

SHELL 13

Node		Sigma Max [Ton/cm ²]	Sigma Min [Ton/cm ²]	Tau Max [Ton/cm ²]	Angle [°]	Von Mises [Ton/cm ²]
Condition c1=1.4d +1.7cv						
14	(+t/2)	-0.04	-0.05	0	74.26	-0.05
	(-t/2)	0.05	0.04	0	-15.74	0.05
26	(+t/2)	0.01	-0.01	0.01	12.22	-0.02
	(-t/2)	0.01	-0.01	0.01	-77.78	0.02
27	(+t/2)	0.02	-0.01	0.02	83.44	-0.03
	(-t/2)	0.01	-0.02	0.02	-6.56	0.03
28	(+t/2)	0	-0.01	0.01	61.23	-0.01
	(-t/2)	0.01	0	0.01	-28.77	0.01

Tabla 11.7. Esfuerzos máximos en pavimento con vehículo C2.

Por lo tanto se observa que el máximo esfuerzo actuante es de 50 kg/cm², si con la fibra y el concreto es posible absorber 26.97 kg/cm², tal y como se determinó anteriormente, queda un esfuerzo de 23.03 kg/cm², el cual debe de absorber el acero de refuerzo.

Con estas nuevas condiciones se realizó un ajuste en el diseño del pavimento. Para ello, se tomó como base la fórmula de la flexión, donde:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (11.5)$$

De donde se obtiene el nuevo momento reducido provocado por la adición de fibras de polipropileno en el concreto:

$$M = \frac{\sigma^* I}{c} \quad (11.5 a)$$

Con el nuevo esfuerzo ajustado por el efecto de las fibras de polipropileno, y analizando un metro lineal de placa del pavimento, se obtuvo:

$$I = \frac{(100)(15)^3}{12} = 28,125 \text{ cm}^3$$

$$C = 7.5 \text{ cm}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (11.5 a), se obtuvo:

$$M = 0.86 \text{ Ton-m}$$

De donde se observa una disminución en el momento máximo, que originalmente era de 1.88 Ton-m. Con este nuevo momento se determinó el área de acero necesaria, de acuerdo a las NTC con la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{M_u}{\phi_j d f_y (1 - 0.5q)} \quad (11.6)$$

Por lo tanto, al aplicar la fórmula (11.6) se obtuvo:

$$A_s = 2.12 \text{ cm}^2$$

Por lo que de acuerdo a la Tabla A1.4, se puede colocar doble malla electrosoldada de 6x6-06/06, la cual tiene un área simple de 1.22 cm², y doble de 2.44 cm².

Asimismo, se puede observar que esta área de acero de 2.12 cm², es un poco mayor a la obtenida por el método del PCA para un vehículo tipo B2 reforzado con fibras de polipropileno, sin embargo, la discrepancia en los valores se debe a los criterios de diseño en cuanto a los factores de seguridad, ya que los modelos de simulación emplean los factores del ACI, los cuales son un poco mayores al del método del PCA.

Independiente al criterio considerado en el diseño, del ajuste de los momentos máximos debidos a la fibra de polipropileno, se puede deducir que el incremento de fibras al concreto, ayuda en la reducción del acero de refuerzo, ya que originalmente se tenía un armado con acero del No.3 16 cm, teniendo que con la adición de las fibras es posible el empleo de la malla electrosoldada.

Por lo tanto, se puede determinar que existió una reducción del 51.9% del acero de refuerzo, sin embargo, para este caso no fue posible la sustitución total del acero por el empleo de las fibras; por lo que el beneficio será exclusivamente en economía.





3ra PARTE. INFORME DE LOS RESULTADOS, CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 12. INFORME DE
LOS RESULTADOS

Contrario a lo que se piensa cuando se diseñan otras obras de ingeniería (edificios, presas o puentes), en los pavimentos no se considera su falla como un hecho catastrófico para la comunidad, de tal forma que es normal aceptar un riesgo moderado antes que construir un pavimento excesivamente caro. Esta visión de buscar la economía con un pequeño margen de seguridad puede constituir una dificultad en el diseño.

Se entiende que la función de un pavimento, es esencialmente la de soportar las cargas y acciones mecánicas de los vehículos, y transmitir las a la capa de terreno donde se apoya, sin que se produzcan deformaciones permanentes en el terreno ni en el pavimento.

Y al mismo tiempo, debe brindar un servicio aceptable durante su vida útil con un bajo nivel de mantenimiento y rehabilitación. Por lo que un aspecto importante en su construcción es minimizar la probabilidad de deterioro temprano, que en general ocurre como agrietamiento y fisuración.

Desde esta concepción, es fácil entender que la losa debe responder a la acción de los vehículos, y el terreno a la acción de la losa. Se puede decir que es un sistema de acción y reacción que interactúa además con el medio ambiente, lo que complica aún más el mecanismo.

Con respecto al comportamiento mecánico de la losa ante el paso de los vehículos se presentan diferentes tipos de cargas, como son las verticales, las tangenciales, las dinámicas, las vibratorias, y las cíclicas. Partiendo de estos conceptos las cargas aplicadas en los modelos son de carácter vertical y cíclico.

La propuesta es lograr obtener un diseño que responda eficientemente a las necesidades de carga e intensidad de tránsito, que someten a los pavimentos a esfuerzos muy altos en las zonas portuarias.

En busca de cumplir con los requisitos de diseño de los pavimentos, a lo largo de este capítulo se presentan los resultados de la investigación obtenidos a través de los modelos de simulación, para desembocar finalmente en las conclusiones del estudio.

Los resultados logrados en esta investigación se realizaron en dos etapas, la primera comprende los resultados del concreto con fibras PP hasta determinar cual es el volumen óptimo en la misma, tal y como se describió en el capítulo 9.

La segunda parte, se presenta en este capítulo y corresponde a la evaluación del comportamiento del concreto reforzado con fibras PP en losas de pavimentos mediante modelos de simulación por computadora; con la finalidad de sustituir la malla electrosoldada total o parcialmente por fibras PP.

En todos los informes se adopta el mismo procedimiento de presentación para la exposición de los datos cuantitativos, acercándose a las características de una investigación *descriptiva*, inicialmente se detalló la problemática del estudio.

Posteriormente respondiendo a las características de la investigación explicativa se contrastaron los resultados de ambas partes de la investigación mediante la estrategia metodológica de *Triangulación*, correlacionando los resultados obtenidos en el laboratorio, para intentar entender y describir el comportamiento de una estructura a través de modelos de simulación.

De esta manera, se obtuvieron respuestas a algunos aspectos en los que se requiere una visión más global sobre el comportamiento del concreto fibroreforzado en los pavimentos.

Se consideró la información cuantitativa obtenida a partir de las pruebas de laboratorio como la base fundamental de los dos análisis.

12.1. Sustitución de la malla electrosoldada

En la evaluación del comportamiento de los modelos de simulación se observó que ante vehículos ligeros los momentos flexionantes y esfuerzos producidos por las cargas, pueden ser absorbidos por un refuerzo a base de malla electrosoldada o bien por un refuerzo en 3D de las fibras de polipropileno.

Conforme las cargas en los vehículos tipo se incrementaron, los momentos flexionantes y esfuerzos en la losa también aumentaron, y los armados requerían la colocación de acero de refuerzo.

El análisis del pavimento con un refuerzo a base de fibras de polipropileno, determinó que en vehículos de tráfico ligero es posible la sustitución de la malla electrosoldada por las fibras PP.

A diferencia de los pavimentos con tráfico pesado, en los cuales el refuerzo a base de fibras PP no fue suficiente para absorber los momentos y evitar las deformaciones.

La estructura del modelo con losa sometido a tráfico ligero (para los vehículos A2 y A2') presenta menos deformaciones verticales, que la del modelo con losa sometido a tráfico pesado C2.

Por lo que puede deducirse que el refuerzo con malla es capaz de transformar las cargas aplicadas en deformaciones menores; por lo tanto la sustitución total del acero por las fibras de polipropileno no es factible en pavimentos con tráfico pesado, ya que el concreto reforzado con fibras tiene una mayor capacidad de deformarse, es decir, se comporta de un modo más dúctil.

Sin embargo, a pesar de que no se recomienda la sustitución total, para el tercer modelo evaluado (vehículo C2), si se adicionan fibras de polipropileno a la mezcla de concreto, se determinó que es posible reducir aproximadamente el 50% del acero de refuerzo, por lo cual solo se hace necesaria la colocación de una malla electrosoldada.

Lo que coincide con las pruebas de laboratorio, en donde se determinó que la adición de las fibras PP al concreto reduce los fisuramientos, ya que estas fibras incrementan la resistencia a la tensión y a la flexión respecto a un concreto sin refuerzo.

Esta situación se ve al mismo tiempo reflejada en el diseño realizado por el método del PCA para un vehículo C2, ya que el módulo de ruptura es el principal parámetro de diseño del método y se determinó que con pequeños incrementos del mismo, el desgaste del pavimento se reduce notablemente.

Es decir, los resultados obtenidos para un pavimento reforzado con fibras con el método del PCA, coincidieron aproximadamente con el tercer modelo de simulación realizado.

Por lo tanto, en estos casos los patrones de comportamiento indicaron la conveniencia de adicionar un porcentaje del 0.25% en peso del cemento en fibras PP al concreto para pavimentos portuarios de tráfico tanto ligero como pesado.

De esta forma se organizaron los resultados, los cuales incluyeron una serie de análisis a través de los cuales se pudo determinar los esfuerzos máximos para las losas en función del tipo de vehículos que se esperaba tener en cada caso, para a partir de estos parámetros determinar cual era el tipo de refuerzo más conveniente en el sistema estructural.

A partir de estos análisis se elaboraron las conclusiones acerca de la influencia de las diferentes variables en el sistema. Se complementó el análisis final y las conclusiones, con los valores obtenidos para las deformaciones y esfuerzos máximos en cada una de las placas que formaban los modelos. Estos valores corresponden a las corridas estructurales que se muestran en el anexo 6.

a) Pavimentos reforzados con fibras PP

Los modelos de simulación se realizaron para pavimentos sin fibra. Los momentos encontrados se obtuvieron considerando un mecanismo óptimo, es decir, el momento actuante máximo para una losa con dimensiones definidas. De esta manera se encontró un momento de diseño más conservador, ante el cual se podía elegir entre dos clases de refuerzos: el tradicional a base de acero o un refuerzo a base de fibras de polipropileno.

Del comportamiento de los especímenes de ensayo y la evaluación de los modelos de simulación de losas de pavimentos se concluye que aunque se nota un incremento en algunas de las propiedades mecánicas del concreto, estas no son suficientes para sustituir el acero de refuerzo en los casos de tránsito pesado. Sin embargo, para los casos en los que los tránsitos sobre el pavimento sean más ligeros, se puede pensar en realizar esta sustitución.

Al respecto, los resultados de la investigación coinciden con las consideraciones generales de diseño del método del PCA, el cual considera que los vehículos ligeros tienen un impacto mínimo en el deterioro de los pavimentos.

Las conclusiones obtenidas en el estudio, se basan en los resultados de los modelos de simulación, encontrándose que la aplicación de las fibras va más allá de una simple avenida de circulación, patios para terminales de contenedores, zonas de almacenamiento, etc; ya que el sistema no se limita y puede ser aplicable a losas de pavimentos en rampas para muelles pesqueros y otras estructuras, en donde al ser pequeñas las cargas que intervienen en los pavimentos, el uso de fibras PP como refuerzo las hace ideales para estas aplicaciones.

Otra posibilidad es la de uso como pavimentos en patios de maniobras de este mismo tipo de muelles, ya que los tránsitos que circulan por ellos siguen siendo cargas de bajo impacto.

Tal y como se pudo verificar por el análisis estructural hecho a través de los modelos de simulación, se nota claramente que para la circulación de vehículos ligeros como los A2 y A'2 comprendidos entre cargas de 2 a 5 toneladas, es posible el reemplazo del acero de refuerzo para los pavimentos a través de las fibras de polipropileno.

b) Pavimentos reforzados con acero de refuerzo

Sin embargo, en el caso del vehículo C2, cuya carga máxima es de 15.50 ton, el refuerzo que proporciona la fibra de polipropileno no es suficiente para soportar por sí solos los esfuerzos tan altos provocados por estas cargas, siendo solamente posible la sustitución de un 50% del acero de refuerzo por medio de las fibras PP.

Independiente de la ayuda que le proporciona la fibra de polipropileno al concreto para soportar los esfuerzos en conjunto con la malla electrosoldada, de los ensayos de laboratorio se obtuvo que estas reducen sustancialmente los agrietamientos, lo que es un buen comienzo para evitar las molestas grietas que tarde o temprano terminarían originando los problemas de corrosión al acero.

Este mejor comportamiento se dedujo de la prueba brasileña, en donde los cilindros que no contenían fibras PP se disgregaron al momento de la falla; mientras que los cilindros que contenían fibras PP se partieron a la mitad sin presentar desmoronamiento del elemento, lo cual indica que la fibra en el concreto ayuda a reducir las grietas, es decir, cuando se presenta la grieta, ésta se detiene al llegar a la fibra, con esto la fibra actúa como mecanismo de protección al concreto evitando su propagación.

Bajo este esquema se concluye que en pavimentos con tráfico ligero se puede hacer la sustitución del acero de refuerzo por fibras PP con porcentajes de 0.25%, el cual se determinó en el capítulo 9 era el porcentaje ideal que lograba incrementar las propiedades al concreto.

Tal y como se observó también durante los ensayos de las diversas muestras de concreto, a mayor cantidad de fibras se reduce la trabajabilidad de la mezcla, dificultando con esto su colocación, por lo tanto si la adición de este porcentaje de fibras no fuera suficiente para la sustitución del acero de refuerzo, no se recomienda aumentar la dosificación de fibras.

Por lo tanto, el empleo de las fibras de polipropileno resulta adecuado para ambos casos, donde a parte de reportar los beneficios técnicos mencionados, también va a ocasionar beneficios económicos, ya que el uso de fibras PP en lugar de acero de refuerzo traerá consigo una inminente reducción de los costos en los pavimentos.

12.2. Control del fisuramiento en losas de concreto

Está visto que las fibras incrementan las propiedades del concreto mejorando su desempeño global lo que a corto plazo se verá reflejado en beneficios técnicos y una economía en la construcción de la estructura, y a largo plazo se verá reflejado en la durabilidad.

Entre las funciones de las fibras PP está el control de la fisuración causada por los cambios de volumen, problema muy habitual de las zonas cálidas como lo es el puerto de Veracruz.

El proceso de agrietamiento en los pavimentos debilitaría toda la losa de concreto y conforme el proceso continúe, las grietas tenderán a propagarse haciéndose cada vez más visibles. Evitar el agrietamiento por retracción es la función que tiene el acero de refuerzo secundario, sin embargo, el acero no siempre está colocado en la práctica correctamente.

En la mayoría de los casos el acero sólo contribuye a mantener unido al concreto después de que este se ha agrietado, independientemente de esta situación, el acero de refuerzo no contribuye a evitar la evaporación, lo cual es una de las principales ventajas de las fibras PP.

A diferencia de esto, y de acuerdo a lo observado en el laboratorio, la presencia de la fibra en la mezcla distribuye los esfuerzos por retracción e intercepta la propagación de la grieta, porque las fibras PP interrumpen la acción capilar de la humedad, por lo tanto, el resultado es un curado más lento, evitando así los agrietamientos por retracción.

La investigación muestra la viabilidad de las adiciones de fibras de polipropileno provenientes de reciclaje a los pavimentos rígidos. Las cantidades de fibras PP pueden variar a gusto del diseñador, los límites razonables que muestra este trabajo son entre 0.25 % y el 0.75 % en peso aún cuando los fabricantes marcan como límite máximo 0.20 %. La recomendación sobre el porcentaje óptimo encontrado en la investigación es del 0.25%.

Asimismo, los ensayos de laboratorio han demostrado la compatibilidad entre las fibras PP y el concreto, su mejoramiento al control de las grietas y el incremento en la de por sí baja resistencia del concreto a la tensión, así como un mejor confinamiento en la pasta de cemento y agregados.

La metodología aquí presentada se ha basado en el cálculo mediante modelos de simulación matemáticos y ensayos de especímenes en el laboratorio, y se complementaron con el análisis de la normatividad vigente de diseño de pavimentos portuarios ROM 4.1-94, las cuales aunque fueron editadas por Puertos del Estado en España, son aplicables a la ingeniería portuaria de México.

A partir del análisis estructural realizado mediante los modelos de simulación y a través de la estrategia metodológica de Triangulación se buscó correlacionar el comportamiento de la fibra en el interior de un pavimento, encontrándose que la fibra sirve como puente de enlace, lo que ayuda al mismo tiempo a distribuir uniformemente los esfuerzos internos debido a los cambios volumétricos que intentan separar al elemento de concreto.

La distribución tridimensional de esas mini-redes provoca la reducción en el agrietamiento del concreto, por lo que el patrón de comportamiento del mismo se modifica, ya que un concreto sin fibras al ser sometido a un esfuerzo de tensión se agrieta cuando sobrepasa el esfuerzo que el concreto es capaz de soportar.

En la práctica, estas grietas se hacen cada vez mayores y se enlazan con otras, pero en el laboratorio al incrementar la carga, las grietas son cada vez más inestables y comienzan a traspasar al espécimen de un lado a otro, tal como se observó durante los ensayos de tensión indirecta.

En el caso de los pavimentos se prevé que sucederá lo mismo que en los especímenes, y que al incrementarse los esfuerzos las grietas comenzarán a traspasar el espesor de la losa, sin embargo, en un concreto que contenga fibras, estas interrumpirán y estabilizarán las grietas evitando el agrietamiento total de la estructura.

El efecto del comportamiento de la fibra de polipropileno en un pavimento, se pudo deducir a partir del comportamiento de los especímenes en el laboratorio. Sin embargo, la investigación determinó como punto final el análisis estructural mediante los modelos de simulación, dejando como una posible y nueva línea de investigación la aplicación de tramos experimentales de pavimentos con este nuevo tipo de refuerzo, para analizar su comportamiento.

Otro efecto de las fibras PP observado en el laboratorio, es que provocan que el concreto produzca una menor cantidad de agua exudada, eliminándose así los capilares que se forman durante el proceso de exudación, lo que ayuda a prevenir el asentamiento plástico.

Por lo tanto el comportamiento de las fibras PP las hace ideales para trabajar en ambientes salitrosos como son las zonas portuarias, debido a que no reaccionan químicamente con el concreto, no son susceptibles de corrosión, no necesitan de mano de obra especializada para su colocación y resultan menos costosas que el acero de refuerzo convencional.

El control del fisuramiento es de gran importancia principalmente en elementos de concreto armado ya que existe una estrecha relación entre este parámetro y la durabilidad del sistema.

En cuanto al acabado del concreto, no afecta la terminación de las losas, y no se necesita de ninguna herramienta especial para su terminación. Si el acabado de las losas es terminado a mano serán visibles algunas fibras, pero pueden ser removidas con un procedimiento de sopleteado ligero en caso de que no deban ser visibles.

Otra de las ventajas de las fibras PP es que si de antemano sabemos que la función de los pasadores en un pavimento no es estructural, lo que sería antieconómico, sino la de mantener unidas las fisuras que inevitablemente aparecen en las losas largas, la adición de fibras PP al concreto al reducir la fisuración y mantener el elemento de concreto unido puede permitir eliminar o al menos disminuir el uso de los pasadores.

Existen diversos estudios realizados por la Universidad Metropolitana de Ingeniería Civil y por el Departamento de Ingeniería en Construcción Civil en Sao Paulo, en Brasil; otros más realizados por la US Army Corps of Engineers, el ACI (American Concrete Institute), en los cuales sus resultados varían de acuerdo a la metodología aplicada. Estos efectos pueden ser producto de las dosificaciones de fibras, características geométricas de las mismas, granulometría de los agregados empleados en la elaboración de los especímenes, geometría de los modelos de ensayo, así como de la metodologías.

Como conclusión final, los resultados del estudio muestran que no solo conviene emplear las fibras PP como refuerzo secundario para el control de la fisuración por cargas externas, sino que también es posible sustituir el acero estructural en pavimentos de concreto de tránsito ligero.



CAPITULO 13. CONCLUSIONES

De acuerdo a los especímenes ensayados en el laboratorio, se pudo observar que en las mezclas fibroreforzadas al someterlas a cargas externas, las fibras ayudaron a controlar las grietas.

En general el enfoque de la investigación fue evaluar el comportamiento del concreto con fibras PP y su posible aplicación a estructuras de tipo portuario.

De los resultados obtenidos en el laboratorio, existen cuatro razones que justifican la adición de las fibras PP al concreto:

- Control de las grietas de contracción plástica que aparecen en las estructuras de concreto. La ventaja de reducir estas grietas es más importante que simplemente mejorar la apariencia de un pavimento o alguna otra estructura; ya que la ausencia de grietas evita la entrada de factores externos como son agentes químicos, salitre, etc., aumentando con eso la durabilidad de la estructura
- La segunda razón es aumentar la ductilidad del concreto ya que la carga se transfiere a través de la fibra y se reparte hacia todas direcciones, evitando concentrarse así, en un punto fijo
- La tercera razón es que el concreto con fibras desarrolla mayor resistencia a fracturas y al mismo tiempo ayuda a prevenir el astillado o fragmentación del concreto
- La cuarta razón es que ante tráfico ligero las fibras mejoran el comportamiento a la flexión del concreto pudiendo sustituir la malla electrosoldada por fibras PP. Sin embargo, el comportamiento no se extiende hacia pavimentos de tráfico pesado, donde si es necesaria la colocación de la malla electrosoldada

Finalmente, las conclusiones se dividieron en dos apartados, el primero corresponde al comportamiento de las fibras PP dentro de las mezclas de concreto, y la segunda parte corresponde al análisis de los modelos de simulación de losas de concreto fibroreforzados para pavimentos en aplicaciones portuarias

13.1 Beneficios técnicos de las fibras PP en el concreto

De las pruebas realizadas en el laboratorio y los resultados en ella obtenidos y analizados en el capítulo 10 se pudieron obtener las siguientes conclusiones generales:

- Conforme el volumen de fibras se incrementa, se reduce la trabajabilidad de la mezcla, sin embargo, en adiciones menores al 1% (como en las elaboradas en la investigación) no se presentan problemas de grumos en las mezclas o problemas ocasionados por la incorrecta dispersión de las fibras, teniendo estos un comportamiento aleatorio al adicionarlas al concreto
- La reducción en la trabajabilidad de la mezcla CF1 (0.25%), la cual se determinó de acuerdo a las gráficas de comportamiento, que es el porcentaje de fibra óptimo por adicionar en los especímenes, no es lo suficientemente importante como para hacer necesaria la consideración de precauciones adicionales en los procesos de preparado y vaciado de la mezcla de concreto una vez que se esté trabajando en la obra

- En el proceso de premezcla, el refuerzo de la fibra de polipropileno actúa de forma tridimensional, pues las fibras se orientan en las tres direcciones
- Debido a que dentro de las propiedades que mejoran las fibras en el concreto son la flexión y la tensión, su aplicación ideal es para los pavimentos. Sin embargo, para altos esfuerzos de flexión de acuerdo a los modelos de simulación se aprecia claramente que las fibras de polipropileno no son un sustituto ideal del acero de refuerzo principal

La adición de las fibras PP es tan simple que puede realizarse en la planta dosificadora o en el camión mezclador en el sitio de trabajo. En cualquier caso, debe realizarse suficiente mezclado, normalmente de 70 a 100 revoluciones del tambor a velocidad de mezcla, con lo cual se asegurará una distribución pareja de las fibras a través del concreto, esto de acuerdo a la especificación ASTM C-90.

Los beneficios técnicos que se pueden obtener de la aplicación de las fibras PP al concreto son numerosos, tal y como ya se determinó al seguir el comportamiento de especímenes en el laboratorio. Algunas de las ventajas técnicas de su uso, así como la explicación de su comportamiento dentro de la masa de concreto se explican más detalladamente a continuación.

a. Reducción de grietas por asentamiento plástico

El agrietamiento por asentamiento plástico que se presenta durante las primeras horas del acabado del concreto se produce por el asentamiento del agregado o el acero de refuerzo, lo que origina esfuerzos de tensión, los cuales al sobrepasar la de por sí baja resistencia del concreto originan los molestos agrietamientos.

Como las fibras de polipropileno envuelven al agregado y restringen su movimiento dentro de la mezcla, esto contribuye a disminuir los agrietamientos.

Además, otra forma en la que las fibras PP ayudan a detener los agrietamientos, es la misma que la observada en el laboratorio, es decir, si una microfisura se comienza a originar y se propaga, ésta es detenida al llegar a la primera fibra, previniendo así el futuro desarrollo de la grieta.

En el caso de los pavimentos las fibras se distribuyen aleatoriamente, formando un refuerzo que se distribuye en forma tridimensional, formando con esto un refuerzo, tal y como se demostró en los modelos de simulación. Dicho refuerzo es capaz, para el caso de los pavimentos sometidos a tráfico ligero, de soportar los esfuerzos de flexión provocados, evitando así el empleo de la malla electrosoldada.

b. Reducción de grietas por contracción plástica

Básicamente este tipo de grietas se producen en las primeras 24 horas de terminado el concreto, por la pérdida de agua por evaporación en la superficie de las losas, lo que provoca un cambio de volumen, y como consecuencia se producen esfuerzos de tensión en la capa superficial.

Las fibras ayudan a eliminar estos agrietamientos, al reducir la exudación del agua en la mezcla, reduciendo los índices de evaporación en la superficie del pavimento.

c. Mayor durabilidad

De esta forma, al evitarse los agrietamientos en los pavimentos, se tiene una mayor durabilidad en la estructura, ya que las grietas son la puerta de acceso a los agentes externos como la humedad, el agua, el oxígeno y dióxido de carbono entre otros, evitando de esta manera la corrosión del acero de refuerzo (en la caso de los pavimentos sometidos a tráfico pesado).

d. Evita el descascaramiento de los elementos

En todas las pruebas realizadas, se observó que en los especímenes que no contenían fibras se fracturaron conforme se incrementaba la carga y los elementos se disgregaban, sin embargo, los que contenían fibras se mantuvieron unidos por ellas, es decir, cuando la grieta llega a un punto donde se encuentra la fibra, esta se detiene, por lo que entre mayor sea el porcentaje de fibras que contiene la mezcla existe mayor posibilidad que una grieta encuentre un filamento de la fibra, deteniendo el proceso de agrietamiento y el descascaramiento del elemento.

Con esto se ha probado la habilidad del concreto reforzado con fibras PP para continuar soportando carga, aún cuando los especímenes ya habían llegado a la carga de ruptura.

Aún así, los elementos se mantuvieron unidos sin colapsar, a diferencia de lo que ocurrió con los especímenes sin fibras, los cuales al llegar a la carga de ruptura se separaban completamente.

Por lo tanto, la adición de fibras PP a las mezclas de concreto tiene un efecto significativo en el modo de falla, demostrando con este comportamiento que el concreto con fibras falla de un modo más dúctil; en contraste con el concreto sin fibras, cuya falla fue frágil gracias a su incapacidad para absorber una mayor cantidad de carga después de la falla, rompiéndose, separándose y ocasionando el desmoronamiento en el elemento.

e. Resistencia a la compresión

El objetivo principal de la investigación no era incrementar la resistencia a la compresión del concreto. A pesar de ello, se pudo probar que la adición de fibras PP a las mezclas se vio reflejado en incrementos en la resistencia a la compresión entre el 9.3 y el 13.2% a los 28 días, para adiciones inferiores al 0.50%, ya que a partir de este volumen, los especímenes fabricados con la mezcla CF3 (0.75%) tuvieron una notable reducción en su resistencia del 16.2 % también a los 28 días.

En los especímenes al momento de formarse las caras de fractura, se obtuvo la falla típica a la compresión de un “reloj de arena”, sin embargo, en la mezcla sin fibras, el elemento tuvo la tendencia a separarse; mientras que en las mezclas con fibras, los elementos permanecieron unidos por las fibras (cuya orientación fue aleatoria), las cuales resistieron los esfuerzos de fractura mejor que los cilindros fabricados con la mezcla patrón.



Imagen 13.1 Comportamiento de especímenes en ensayo a compresión.

f. Resistencia a la tensión

En los concretos donde se adicionaron las fibras no se percibe un sustancial incremento en la resistencia a la tensión, sin embargo, la mejora es en el comportamiento post-agrietamiento ya que el material se hace más flexible permitiéndole repartir de mejor manera los esfuerzos.

Durante la prueba de tensión indirecta, al momento en que se inicia la fisuración de la zona tensionada del cilindro, para las mezclas CF1, CF2 y CF3, se asumió que comenzaron a trabajar las fibras desde el inicio y que continuaron haciéndolo hasta que el elemento se rompió a la mitad por la carga de tensión. A pesar de haber ocurrido la falla el elemento se mantiene unido, y conforme el volumen de fibras fue más alto en las mezclas de concreto, fue más difícil lograr que se separaran.

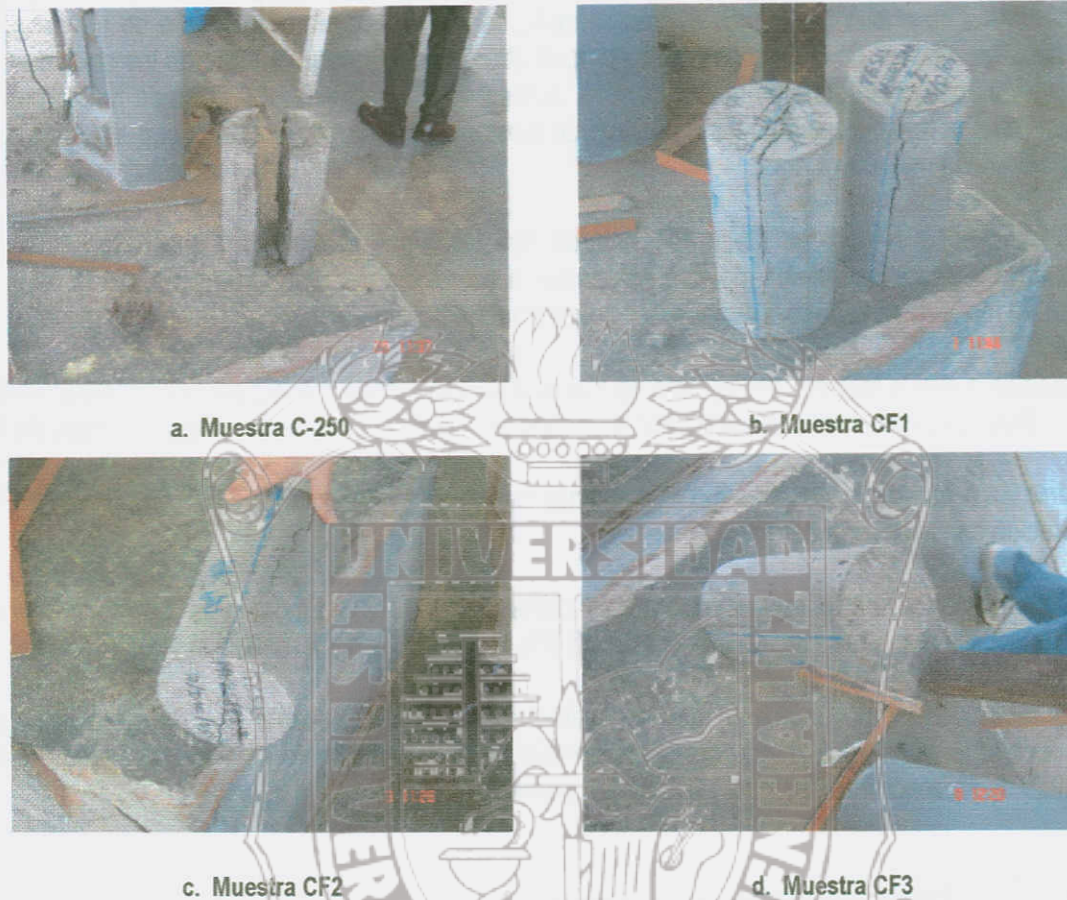


Imagen 13.2 Comportamiento de especímenes en ensayo a tensión indirecta.

En los especímenes al momento en que ocurrió la fractura, las fibras quedaron expuestas y se observó en el comportamiento de la superficie de las fibras una gran unión entre ellas y la pasta de cemento, esto tal y como se explicó anteriormente se debió al lavado del agregado grueso previo a la fabricación de las mezclas de concreto.

A diferencia del concreto sin fibras (mezcla C-250) donde la falla se presenta a la mitad con un corte casi perfecto e inmediatamente que se ha llegado a la carga de ruptura se produce la separación del elemento.

g. Resistencia a la flexión y módulo de ruptura

El comportamiento observado en los especímenes durante el ensayo a flexión, fue de mínima deflexión hasta que se alcanzó la carga máxima donde aparece la primera grieta. Posteriormente el espécimen sostiene la carga, un poco más y va disminuyendo paulatinamente, mientras que la deflexión se incrementa sustancialmente.

Se observó la formación de pequeñas grietas adicionales a la primera. Al aparecer la primera grieta fue incrementando su ancho durante la aplicación de la carga, por lo que únicamente se generó un solo plano de falla, a pesar de que se pudieron apreciar otras grietas muy pequeñas en los costados de los especímenes, pero estas grietas fueron apenas visibles, a diferencia de la prueba de tensión indirecta donde se notó la transferencia de los esfuerzos de tensión en la matriz de concreto no afectada durante la aparición de la primera grieta.

En los ensayos a flexión las fibras PP evitaron que las vigas presentaran una falla súbita y que finalmente colapsaran manteniendo la pieza unida, a diferencia del comportamiento de la mezcla sin fibra donde la pieza se separa al llegar a la falla con mucha facilidad.

Esto condujo a que la falla en las viguetas no fuera frágil, como en la mezcla patrón (sin fibras PP), sino que se reflejó un cierto comportamiento dúctil que aumentó con el incremento en el porcentaje de fibra.

El módulo de ruptura a los 28 días fue ligeramente menor para la mezcla CF3 (0.75% de fibras PP) en comparación con la mezcla patrón.

A diferencia de esta mezcla, en la mezcla CF1 (0.25% de fibras PP), el módulo de ruptura tuvo un valor de 50 Kg/cm², es decir, tuvo un incremento del 23.8 % en relación con la mezcla sin fibras.

De este modo, se logró determinar que la cantidad de fibras PP presente en la mezcla de concreto incide directamente en el aumento de la resistencia a la flexión de éste, cumpliéndose que a mayor porcentaje de fibra adicionado, mayor es el aumento de la resistencia a la flexión.

h. Fibras de polipropileno y/o malla electrosoldada

El uso del acero de refuerzo presenta algunas desventajas, las cuales ya han sido mencionadas anteriormente, y que a continuación se enumeran:

- Presentan problemas de corrosión
- En algunos casos se requieren protección por inmersión en caliente
- Problemas para asegurar el recubrimiento mínimo durante su colocación en obra
- Requieren la colocación por trabajadores especializados

En contraposición a esto, las fibras de polipropileno al colocarlas en las mezclas de concreto se distribuyen aleatoriamente en la mezcla formando un refuerzo tridimensional, por lo que pueden soportar tensiones en los tres planos, a diferencia de la malla electrosoldada, que solo actúa en un solo plano como refuerzo.

Adicionalmente, las fibras de polipropileno:

- Son más económicas que la malla electrosoldada
- No se requiere de mano de obra especializada para su colocación

Sin embargo, las fibras PP tienen un límite para absorber los esfuerzos de tensión, a diferencia de la malla electrosoldada y/o el acero de refuerzo, los cuales simplemente con incrementar su área pueden soportar prácticamente un número ilimitado de esfuerzos de tensión, lo que no se puede hacer con las fibras PP, ya que si se incrementa su volumen y se sobrepasa el volumen crítico, lejos de soportar mayores tensiones, solo provocará una menor resistencia en el elemento de concreto construido con esa mezcla.

13.2 Beneficios económicos de pavimentos reforzados con fibras PP

Para determinar cuales son los beneficios económicos se realizó una comparativa de diversos tipos de pavimentos armados con malla electrosoldada y con fibras de polipropileno, sin olvidar que al costo de la malla electrosoldada se le debe sumar el costo por inmersión en caliente.

El análisis se realizó por m² de pavimentación para diferentes espesores, tentativos, tomando como base el espesor de 12 cm obtenido por el método del PCA.

La dosificación recomendada fue de 833 grs de fibra por metro cúbico de concreto para la mezcla CF1, de esta forma, se tiene que para una losa de espesor 12 cm, el valor por metro cuadrado de placa será \$ 8.40 por concepto de fibras, considerando un costo de \$ 50.0 por empaque de 600 grs de Sikafiber, que fue el aditivo usado en la investigación.

El mismo criterio se aplica en todos los casos, ya que al aumentar el espesor de la placa se tienen consumos de fibras de polipropileno proporcionalmente superiores en costos, pero cabe destacar, que adicionalmente los costos en la malla electrosoldada se incrementan en proporciones mayores.

De la Tabla 13.1 se puede apreciar que en todos los casos, el costo del refuerzo tridimensional de concreto con fibras de polipropileno es inferior al costo de refuerzo de acero convencional. Sin embargo, no hay que perder de vista que las fibras PP solamente pueden aplicarse a pavimentos con tránsito ligero, mientras que el acero continúa teniendo un uso ilimitado.

Pavimentación					
Espesor de la placa en (m ²)	Costo de la fibra PP	Tipo de malla	Costo de la malla	Costo por inmersión en caliente	Costo total
0.12	\$8.40	6x6-06/06	\$13.85	\$9.26	\$23.11
0.15	\$10.42	6x6-04/04	\$16.07	\$12.74	\$28.81
0.20	\$13.92	Doble 6x6-04/04	\$32.14	\$12.74	\$44.88

Tabla 13.1. Comparativo de costos de fibras frente a las mallas.

Finalmente se puede concluir que las fibras PP brindan beneficios superiores a los del acero de refuerzo no estructural en los pavimentos de tránsito ligero, además, es importante observar que en la Tabla 13.1 no se han incluido costos asociados a las mallas como transporte y valor de mano de obra para su colocación, costos que no involucran en ningún caso las fibras de polipropileno.

13.3 Otras aplicaciones del concreto con fibras PP

Las fibras de polipropileno tienen excelentes propiedades, que hacen de ellas el refuerzo ideal para materiales de concreto por su alto rendimiento y la disminución de figuraciones en los elementos de concreto.

Las principales cualidades que las fibras PP confieren al concreto son:

- a. Durabilidad, ya que la fibra utilizada es inmune a la acción de la corrosión en ambientes altamente salitrosos.
- b. Mayor resistencia al impacto, debido a la absorción de energía por los filamentos de la fibra.
- c. Resistencia a los agentes atmosféricos.
- d. Sustitución del acero de refuerzo en pavimentos sometidos a tráfico ligero.
- d. Fácil colocación, lo que reduce los costos de personal especializado.
- e. Gran resistencia contra la propagación de fisuras.
- f. Reduce los cuidados de protección al acero de refuerzo por inmersión en caliente.

Así como este trabajo de investigación busca aplicar los concretos reforzados con fibras de polipropileno a los pavimentos rígidos, dependiendo de los resultados de las muestras a ensayar, el diseño de las mezclas puede adaptarse para diseñar otro tipo de estructuras para tener otros campos de aplicación. A continuación se dan algunos ejemplos.

Tanques de agua: Ya que las fibras de polipropileno suelen ser impermeables, pueden ser aplicadas a este tipo de estructuras.

Estructuras marinas e hidráulicas: Puede incrementarse su durabilidad gracias al incremento que por acción de las fibras de polipropileno se pueda obtener, reduciendo los problemas de corrosión al igual que en el caso de los pavimentos.

Pisos trabajos pesados: Como en industrias y zonas de alto tráfico, el sistema de concreto fibroreforzado asegura una superficie resistente al impacto.

Independientemente de su campo de aplicación con el estudio de los sistemas compuestos por fibras sintéticas se busca alargar el periodo de vida útil de las estructuras, reducir costos, facilitar el sistema constructivo y reducir los costos de mantenimiento; si a esto le agregamos que el empleo de estas fibras no causa un impacto negativo al medio ambiente tendremos entonces un nuevo material altamente resistente y durable, cuyo costo es deseable comparar frente a los actuales sistemas de construcción.

13.4 Evaluación de los modelos de simulación

La conclusión final obtenida de los modelos de simulación es que las fibras PP son un mejor refuerzo para pavimentos con tránsito ligero (zonas de vialidades, estacionamientos de oficinas, etc), que la malla electrosoldada debido a su facilidad de colocación, que son menos costosas y no requieren una protección adicional ni están expuestas a los efectos de la corrosión.

A pesar de sus ventajas, esta sustitución no se puede realizar en pavimentos portuarios sometidos a tráfico pesado, ya que en estos casos las fibras no son capaces de absorber los esfuerzos de flexión ocasionados por las altas cargas impuestas. Aún así, a pesar de que estos pavimentos deben ir armados con acero de refuerzo tradicional, se recomienda que se coloque la fibra PP para reducir los agrietamientos ocasionados por la contracción y/o asentamiento plásico.





CAPÍTULO 14. PROSPECTIVAS
DE LA INVESTIGACIÓN

Concluida la exposición de la investigación, se considera oportuno proponer nuevas líneas de investigación que han surgido de los resultados y conclusiones de este trabajo.

Estas interrogantes surgidas en torno al tema de estudio pueden obtener una respuesta en futuros proyectos de investigación concretándose en las siguientes reflexiones:

A pesar de que los materiales de construcción han mejorado con el paso del tiempo, aún continúa la búsqueda por encontrar innovaciones. La investigación muestra la posibilidad de aplicar un material nuevo con el objeto de mejorar un material tradicional como el concreto. Algunos de los aspectos evaluados en la tesis son:

- Mejoramiento en el diseño de las mezclas de concreto, al incrementar sus propiedades mecánicas mediante la adición de fibras sintéticas de polipropileno, por lo que se propone:
 - Investigar con la finalidad de realizar una norma mexicana que estipule el tipo de concreto (diseño de la mezcla) para la fabricación de infraestructura marina o terrestre resistente a la corrosión
- Disminución de los problemas de corrosión en las estructuras marinas de concreto reforzado, en el caso particular de los pavimentos, aún cuando las mezclas mejoradas se puedan aplicar a otras estructuras marinas

A pesar de que claramente se observó durante el proceso de la investigación que los efectos de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto son más altos en las zonas costeras del Golfo de México, no existe un estudio del estado de degradación por corrosión en nuestro país.

Por ejemplo el sistema carretero nacional cuenta con un programa de administración de conservación y mantenimiento de su infraestructura que permite conocer de manera genérica, el estado actual de conservación de cada obra, para así programar reparaciones dependiendo del nivel de daño cuantificado y calificado, lo cual no existe dentro del sistema portuario.

Por esto se propone

- Determinar, con base en estudios costeros y regionales, el efecto del medio ambiente en el concreto reforzado, su degradación, avance y daños con base a las mezclas de concreto locales
- Establecer un programa que cuantifique la degradación que por corrosión se está generando en estructuras marinas como muelles, pavimentos y demás estructuras de concreto en general en todos los puertos del país
- Realizar investigaciones para definir una tendencia predecible o una uniformidad de severidad del ambiente en las distintas regiones del país; para contar con un conocimiento actual cuantificado y regional de la agresividad de los distintos ambientes costeros y del interior del país que permitan normalizar el tipo de concreto y los refuerzos para emplear en la construcción de obras de ingeniería en cada zona, para que resistan adecuadamente los problemas generados por la corrosión, los cuales a la

fecha a pesar de los graves deterioros que ocasionan se desconocen con exactitud los índices de corrosión en cada región

- Análisis de las características granulométricas y demás propiedades mecánicas de los agregados del puerto de Veracruz para contar con información detallada de la zona para el diseño de las mezclas de concreto

Toda obra de ingeniería que se construye en México debe obedecer cierta normatividad de tipo estructural, empleando agregados locales para cada obra, y que no existe un conocimiento preciso en cada localidad de la agresividad del medio ambiente ni de sus componentes, por lo que no es factibles que se diseñen o construyan estructuras "durables" de concreto reforzado que resistan al deterioro ambiental de la zona.

Esto es, el desconocimiento del medio ambiente que rodeará a una estructura, su reacción con los agregados locales y la agresividad resultante no favorecen la construcción de obras de infraestructura que resistan los embates degradantes del medio ambiente y, por lo tanto, la vida útil de la misma se puede ver mermada, se propone por lo tanto la siguiente línea de investigación:

- Estudio para obtener información valiosa, y certera de la agresividad del medio ambiente, en combinación con agregados típicos de la región para determinados tipos de concreto, tanto en escala regional como nacional, para así poder sugerir y normar los estándares de diseño y construcción que se deban seguir en aquellos lugares donde se pretendan construir obras de infraestructura.
- El estudio de los diversos tipos de fibras sintéticas que existen en el mercado para su adición al concreto lo que ofrece una muestra de la importancia que están cobrando la aparición de estos aditivos que provienen del reciclaje de plásticos.

Sin embargo basado en la conciencia ambientalista, de este tipo de desechos no solamente se pueden obtener fibras sintéticas, en años recientes han aparecido en el mercado algunos geosintéticos, por lo que se sugiere la necesidad de realizar los siguientes estudios:

- Estudio de los geotextiles tejidos y no tejidos para aplicaciones civiles y ambientales
- Estudio de como películas tejidas pueden estabilizar los terrenos que sirven de base a los pavimentos
- Estudio de los geotextiles para el control del drenaje y la erosión con aplicación de estructuras marinas

- En relación a la problemática que suscitan la generación indiscriminada de desechos, se recomienda realizar los siguientes estudios:
 - Estudio sobre la obtención de fibras sintéticas optimizando su proceso de elaboración con la finalidad de reducir costos
- La fabricación de varias mezclas de concreto con fibras PP, adicionadas en varios porcentajes para la evaluación de sus propiedades físicas.

Al respecto, se notó que la adición de las fibras de polipropileno reduce la trabajabilidad de las mezclas de concreto, por lo que se sugiere la necesidad de realizar los siguientes estudios:

- Adición de aditivos fluidizantes a las mezclas en conjuntos con las fibras PP para ver si es factible el empleo de ambos aditivos juntos, así como la determinación de las dosificaciones correspondientes

Finalmente, las conclusiones extraídas del presente estudio, han permitido establecer una panorámica más amplia acerca de los diversos tipos de fibras que existen en el mercado, así como el proceso del agrietamiento del concreto por efectos de la corrosión. Además, se mencionan varias de las causas externas que provocan el agrietamiento del concreto, no solamente la ocasionada en su estado plástico.

El análisis de la situación de este material en los próximos años estará condicionado por los reglamentos de construcción vigentes, por lo que se sugiere realizar investigaciones más profundas de este estudio con la finalidad de editar una norma que pueda incluirse en una reglamentación para el Estado de Veracruz

Pues debido a la falta de reglamentación en el Estado, todas las estructuras se diseñan de acuerdo al Reglamento RDF, a pesar de que como se ha visto a lo largo de la investigación los índices de corrosión son completamente diferentes para las zonas costeras que para las zonas del interior de la República, al margen de las diferencias de suelos y otros elementos que también deben ser considerados por el encargado del diseño estructural.

Sin embargo, lo ideal no solo sería contar con un estudio en el estado, sino a nivel nacional que permita realizar diseños más realistas y que proporcionen una mayor confiabilidad respecto a la durabilidad de las estructuras.

Y dentro del ámbito de los pavimentos, es conveniente dejar claro que aunque la adición de fibras PP mejora notablemente algunas de las características de la mezcla, dentro de la investigación es necesario realizar futuras investigaciones en tramos de prueba o ensayos de pistas para determinar el efecto de las fibras PP ante el efecto climatológico y la fatiga.



Anexo 1. Elementos que componen un firme portuario

La clasificación de las diversas zonas terrestres que componen un puerto, desarrolladas en el capítulo anterior permite realizar algunas consideraciones de diseño para contribuir al mejoramiento en el dimensionamiento de los pavimentos.

La principal función de estas zonas es recibir las cargas, tanto estáticas como dinámicas a las que estarán sometidas y repartirlas sobre la explanada. Estas superficies están constituidas por capas relativamente horizontales de distintos materiales debidamente extendidos y compactados.

Con estos fines, es conveniente describir como se compone un firme portuario ya que existen algunas diferencias entre estos y los pavimentos en carreteras. El objetivo de este capítulo es exponer los criterios fundamentales para caracterizar el cimiento de los firmes. Por lo cual se aborda la conceptualización de algunos factores determinantes en las consideraciones de diseño de un pavimento portuario, destacando aquellos que se consideran relevantes desde el punto de vista estructural.

Cabe destacar que se parte del conocimiento previo de la situación de los pavimentos en general, particularizándolo al caso de los firmes portuarios, cuya base es una amplia recopilación de autores especializados en las zonas portuarias, en el cual se ha apoyado esta investigación tratando de ofrecer una interpretación de la situación que aproxime al lector a las variables de influencia en la durabilidad de los pavimentos portuarios.

A1.1 Tipología general de un firme portuario

El anexo incluye brevemente una descripción de cada una de las partes que constituyen un firme portuario.

A partir de este resumen, el estudio se concentra en la estructuración de los firmes portuarios, las funciones y requisitos que deben de cumplir cada una de sus partes.

De acuerdo a lo estipulado anteriormente, como definición de **firme portuario** se entiende que es toda aquella estructura formada por varias capas, capaz de resistir las cargas impuestas sobre la misma. En el caso más completo se compone de tres secciones, a las cuales se les conoce como pavimento, base y sub-base como se aprecia en la Figura A1.1.

El cimiento de los firmes está formado por la coronación, cuya superficie recibe el nombre de **explanada** y es el apoyo del firme. Por lo tanto, lo importante es la capacidad de soporte de los materiales subyacentes.

En carreteras, los pavimentos se apoyan sobre un terraplén o pedraplén lo suficientemente compactado. Sin embargo, para obras portuarias, en la mayoría de las ocasiones el apoyo de cualquier estructura por lo general está constituido por un relleno de calidad muy variable aunque existen también situaciones similares a las de las carreteras.

Así como los terraplenes están formados por el *cimiento*, el *núcleo* y la *coronación*, en pavimentación portuaria esto es equivalente al *fondo*, el *relleno* y la *coronación*.



Sin embargo, cuando se habla del término *explanada* en sus diferentes clasificaciones, se hace referencia a la capacidad de soporte de todo el conjunto que se encuentra bajo la superficie.

A1.2 Rellenos y explanadas

A1.2.1. Características de los rellenos¹

Los *fondos* que están bajo los rellenos portuarios son en general materiales que ya existen, y que no se pueden sustituir en la mayoría de los casos, a pesar de que se tenga una baja capacidad de soporte.

En cuanto a los *rellenos*, se usan los materiales más próximos, lejos de las exigencias habituales en carreteras, pudiendo ser materiales producto de dragado, los cuales son casi imposibles de compactar.

Estos rellenos pueden ser:

- Hidráulicos
- De vertido directo

Rellenos hidráulicos: Son los provenientes de un dragado, con alto contenido de sólidos en suspensión. Son los que presentan mejor calidad/precio.

Rellenos de vertido directo: Son aquellos realizados con materiales terrestres, pudiendo ser granulares, cohesivos, pedraplenes limpios, etc.

Finalmente, la *coronación* a menudo no existe, solo cuando los requerimientos del proyecto así lo pidan para dar una cierta calidad, espesor suficiente y una compactación adecuada, necesaria para dar una capacidad de soporte dentro de los límites aceptables del firme.

A1.2.2. Características de las explanadas

La realización de rellenos con materiales producto de dragado provoca una acumulación de finos en la superficie difícil de eliminar, por lo cual en tales casos es necesaria la colocación de un material de mejor calidad.

La *explanada* se define como la superficie de coronación. Se recomienda el empleo de un material de cierta calidad, en espesor suficiente (1 metro mínimo), debidamente compactado, de estos factores dependerá la capacidad de soporte de la misma, esta recomendación aplica principalmente en zonas donde la coronación se encuentra bajo el nivel del agua.

Los materiales empleados para las coronaciones suelen ser suelos de cierta calidad, como los rellenos compactados en carreteras.

La combinación de los diferentes tipos de rellenos y las distintas situaciones de coronación permite clasificar las explanadas portuarias en cuatro categorías:

Explanada deficiente	E0
Explanada aceptable	E1
Explanada buena	E2
Explanada muy buena	E3

Tabla A1.1. Clasificación de las explanadas¹.

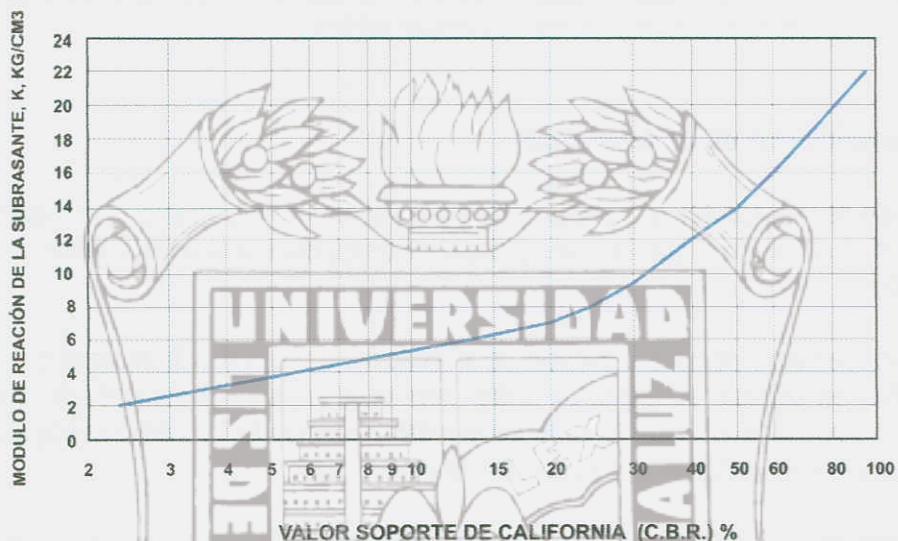
En general, en suelos que tienen un CBR >20, se les considera como una explanada muy buena tipo E3.

A1.3 Capas inferiores de un firme

El soporte dado a los pavimentos de concreto por la base y la sub-base, es un factor determinante en el diseño de espesores de un pavimento. El terreno de apoyo está definido en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (K).

Los valores de K son usualmente estimados mediante una correlación a pruebas más simples como la del CBR (valor Relativo de Soporte). El resultado es válido porque no se requiere una exacta determinación del valor K; ya que variaciones normales del valor K no afectan significativamente los requerimientos del espesor del pavimento. La relación mostrada en la Figura A1.2 es correcta para estos propósitos.

Figura A1.2. Relación entre el CBR y el módulo "K".



A1.3.1 Sub-bases granulares

Es la capa de material situada entre la base del firme y la explanada. No existe siempre, solo en casos de que la explanada no tenga la calidad suficiente.

Por lo general, son capas granulares de granulometría continua cuyos materiales obtenidos de gravera se emplean tal cual o con una pequeña reconstitución granulométrica

A1.3.2 Bases granulares

Es la base sobre la que se apoya el pavimento y que está situada encima de la explanada o de la sub-base en caso de haberla. Existen dos tipos de bases de acuerdo a los materiales empleados: los granulares y los tratados con aglomerantes (bituminosos, conglomerantes hidráulicos o puzolanicos).

Para pavimentos de concreto se emplean bases granulares formadas por áridos total o parcialmente machacados, cuya granulometría es de tipo continuo.¹

La colocación o no de capas inferiores de base o sub-base se llevan a cabo en función de la categoría de la explanada que se haya obtenido. Así, se consideran las siguientes cuatro posibilidades:

Explanada E0: Sobre estas explanadas han de disponerse una capa de sub-base de 0.40 m y otra capa de base de 0.25 m.

Explanada E1: Sobre este tipo de explanada se debe de extender una capa de sub-base de 0.25 m y otra de base con un espesor de 0.25 m.

Explanada E2: En esta situación debe extenderse una capa de base con un espesor de 0.25 m.

Explanada E3: Sobre este tipo de explanada no se coloca ninguna capa de base o de sub-base, a excepción de que se indique lo contrario al definirse el pavimento. Sin embargo, con fines de dar una adecuada regularidad al terreno puede emplearse una capa de material mejorado de 0.15 m de espesor como mínimo.

El contar con una sub-base permite incrementar, en parte, el valor de K del suelo que deberá usarse en el diseño de espesor. Si la base es de material granular no tratada ó mejorada, el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en los valores presentados en la tabla A1.2.

k del suelo (kg/cm ²)	k suelo - sub-base (kg/cm ²)			
	Espesores de la sub-base (cm)			
	10	15	22.5	30.5
3.5	4.5	5.3	6.0	7.7
7.0	9.0	9.8	11.3	13.4
14.0	15.5	16.2	19.0	22.5
21.0	22.5	23.2	26.0	30.2

Tabla A1.2. Incremento en el valor de K del suelo, según el espesor de una base granular.

Los valores mostrados en la Tabla A1.2 son basados del análisis de Burmister de un sistema de dos capas y cargado en pruebas de placa hechas para determinar los valores K del conjunto suelo – sub-base en losas de prueba completas.

A1.3.3 Bases cementadas

Las bases mejoradas ó tratadas con cemento aportan mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor y son ampliamente empleadas para pavimentos de concreto con tráfico pesado. Los valores de diseño de módulo de sub-reacción (K) para bases cementadas que cumplen con éste criterio se muestran en la Tabla A1.3.

Sin embargo, aún los suelos tratados con cemento son susceptibles a la falla por fatiga después de aplicaciones repetidas de esfuerzos mayores que algún valor límite.

k suelo - sub-base (kg/cm ²)				
k del suelo (kg/cm ²)	Espesores de la sub-base (cm)			
	10	15	20	25
3.5	12.0	16.2	21.8	27.4
7.0	19.7	28.1	36.6	45.0
14.0	33.0	45.0	58.4	-

Tabla A1.3. Incremento en el valor de K del suelo, según el espesor de una base granular cementada.

A1.4 Predimensionamiento de pavimentos portuarios

Para obtener el dimensionamiento del pavimento se deben combinar todas las variables que intervienen en el diseño, sin embargo, con fines de aproximación se puede estimar en forma preliminar las características de un pavimento de concreto, en base a las cargas de diseño con el siguiente criterio:

Clasificación de carga de diseño	Espesor en cm
CP1	20
CP2	25
CP3	30
CP4	35
Sobre losa de muelle	10

Tabla A1.4. Espesores de pavimentos de concreto³.

La Tabla A1.4 nos indica un prediseño de los pavimentos de concreto, si consideramos que en este trabajo se añadirán fibras PP al concreto con el propósito de incrementar su resistencia, es lógico pensar que los espesores pueden reducirse.

La información anterior menciona los aspectos que condicionan el buen diseño de un pavimento portuario, ahora el propósito de la investigación es indagar sobre aquellos aspectos que puedan condicionar la resistencia del pavimento mediante la adición de las fibras PP buscando un incremento en sus propiedades.

Anexo 2. Tablas de diseño de la PCA

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem
12	43.00	35.60	37.80	30.10	35.10	28.10	33.10	26.80	31.70	25.70	29.10	24.30	27.40	23.50
13	38.40	32.30	33.80	27.30	31.40	25.30	29.70	24.00	28.40	23.00	26.10	21.60	24.60	20.80
14	34.60	29.60	30.50	24.90	28.30	22.90	26.80	21.60	25.60	20.80	23.70	19.40	22.30	18.50
15	31.40	27.20	27.70	22.90	25.70	20.90	24.40	19.70	23.30	18.80	21.60	17.50	20.40	16.70
16	28.70	25.20	25.30	21.20	23.50	19.30	22.30	18.10	21.30	17.30	19.70	16.00	18.70	15.20
17	26.30	23.50	23.30	19.70	21.60	17.90	20.50	16.70	19.60	16.00	18.10	14.70	17.20	13.90
18	24.30	22.00	21.50	18.40	19.90	16.60	18.90	15.50	18.10	14.80	16.80	13.60	15.90	12.80
19	22.50	20.70	19.90	17.20	18.50	15.60	17.50	14.50	16.80	13.80	15.60	12.60	14.80	11.90
20	21.00	19.50	18.50	16.20	17.20	14.60	16.40	13.60	15.60	12.90	14.50	11.80	13.80	11.10
21	19.60	18.50	17.30	15.30	16.10	13.80	15.20	12.90	14.60	12.20	13.60	11.10	12.80	10.40
22	18.30	17.50	16.20	14.50	15.00	13.10	14.20	12.20	13.70	11.50	12.80	10.50	12.00	9.80
23	17.20	16.70	15.20	13.80	14.10	12.40	13.30	11.50	12.80	10.90	12.00	9.90	11.30	9.20
24	16.20	15.90	14.30	13.10	13.30	11.80	12.50	11.00	12.10	10.40	11.30	9.40	10.70	8.80
25	15.30	15.20	13.50	12.50	12.60	11.20	11.90	10.50	11.40	9.90	10.70	8.90	10.10	8.30
26	14.50	14.50	12.80	12.00	11.90	10.70	11.30	10.00	10.80	9.40	10.10	8.50	9.50	8.00
27	13.80	13.90	12.10	11.50	11.30	10.30	10.70	9.50	10.30	9.00	9.50	8.10	9.00	7.60
28	13.10	13.40	11.50	11.00	10.70	9.90	10.20	9.10	9.80	8.60	9.00	7.80	8.60	7.30
29	12.50	12.90	11.00	10.60	10.20	9.50	9.70	8.80	9.30	8.30	8.60	7.50	8.20	6.90
30	11.90	12.40	10.50	10.20	9.70	9.10	9.20	8.50	8.90	8.00	8.20	7.20	7.80	6.60
31	11.30	12.00	10.00	9.90	9.30	8.80	8.80	8.10	8.40	7.70	7.80	6.90	7.40	6.40
32	10.90	11.60	9.60	9.50	8.90	8.50	8.40	7.80	8.00	7.40	7.50	6.70	7.10	6.20
33	10.40	11.20	9.20	9.20	8.50	8.20	8.00	7.60	7.70	7.10	7.20	6.40	6.80	6.00
34	10.00	10.80	8.80	8.90	8.10	7.90	7.70	7.30	7.30	6.90	6.90	6.20	6.60	5.80

Tabla A2.1. Esfuerzo equivalente en pavimento sin apoyo lateral.

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem
12	33.60	28.20	29.50	24.60	27.40	23.10	26.00	22.20	24.90	21.60	23.10	20.80	21.90	20.40
13	30.20	25.60	26.60	22.20	24.70	20.80	23.40	19.90	22.50	19.40	20.90	18.60	19.90	18.10
14	27.40	23.40	24.10	20.20	22.40	18.90	21.30	18.00	20.50	17.50	19.10	16.70	18.20	16.20
15	25.00	21.50	22.00	18.50	20.50	17.20	19.50	16.40	18.80	15.90	17.50	15.10	16.70	14.60
16	22.90	19.90	20.20	17.10	18.80	15.80	18.00	15.10	17.30	14.60	16.10	13.80	15.50	13.30
17	21.10	18.50	18.60	15.80	17.40	14.60	16.60	13.90	16.00	13.40	14.90	12.60	14.30	12.10
18	19.60	17.20	17.30	14.70	16.10	13.50	15.40	12.90	14.80	12.40	13.90	11.60	13.30	11.20
19	18.20	16.20	16.10	13.80	15.00	12.70	14.30	12.00	13.80	11.60	12.90	10.80	12.40	10.40
20	17.00	15.20	15.00	12.90	14.00	11.90	13.40	11.30	12.90	10.80	12.10	10.10	11.60	9.70
21	15.90	14.40	14.00	12.20	13.10	11.20	12.60	10.60	12.10	10.20	11.30	9.50	10.90	9.10
22	14.90	13.60	13.20	11.50	12.30	10.60	11.80	10.00	11.40	9.60	10.70	8.90	10.20	8.60
23	14.00	12.90	12.40	10.90	11.60	10.00	11.10	9.50	10.70	9.10	10.10	8.40	9.70	8.10
24	13.20	12.30	11.70	10.40	11.00	9.50	10.50	9.00	10.10	8.60	9.50	8.00	9.10	7.60
25	12.50	11.80	11.10	9.90	10.40	9.10	9.90	8.50	9.60	8.20	9.00	7.60	8.70	7.30
26	11.90	11.20	10.50	9.50	9.80	8.70	9.40	8.10	9.10	7.80	8.60	7.20	8.20	6.90
27	11.30	10.80	10.00	9.10	9.30	8.30	8.90	7.80	8.60	7.40	8.10	6.90	7.80	6.60
28	10.70	10.30	9.50	8.70	8.90	7.90	8.50	7.40	8.80	7.10	7.80	6.60	7.50	6.30
29	10.20	9.90	9.10	8.40	8.50	7.60	8.10	7.10	7.80	6.80	7.40	6.30	7.10	6.00
30	9.80	9.50	8.70	8.10	8.10	7.30	7.70	6.90	7.50	6.60	7.10	6.10	6.80	5.80
31	9.30	9.20	8.30	7.80	7.70	7.10	7.40	6.60	7.20	6.30	6.80	5.80	6.50	5.50
32	9.00	8.90	7.90	7.50	7.40	6.80	7.10	6.40	6.90	6.10	6.50	5.60	6.20	5.30
33	8.60	8.60	7.60	7.20	7.10	6.60	6.80	6.10	6.60	5.90	6.20	5.40	6.00	5.10
34	8.30	8.30	7.30	7.00	6.90	6.30	6.60	5.90	6.30	5.70	6.00	5.20	5.70	4.90

Tabla A2.2 Esfuerzo equivalente en pavimento con apoyo lateral.

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem
12	3.51	3.61	3.50	3.57	3.49	3.54	3.48	3.52	3.48	3.51	3.47	3.49	3.45	3.47
13	3.41	3.53	3.39	3.48	3.39	3.45	3.38	3.43	3.38	3.41	3.37	3.39	3.35	3.37
14	3.32	3.45	3.30	3.39	3.29	3.36	3.28	3.34	3.28	3.33	3.27	3.30	3.25	3.28
15	3.23	3.37	3.21	3.31	3.20	3.28	3.19	3.26	3.19	3.24	3.18	3.22	3.16	3.20
16	3.15	3.30	3.12	3.24	3.12	3.21	3.10	3.18	3.10	3.17	3.09	3.14	3.08	3.12
17	3.07	3.24	3.05	3.17	3.04	3.14	3.02	3.11	3.02	3.10	3.01	3.07	3.00	3.04
18	2.99	3.18	2.97	3.11	2.96	3.07	2.95	3.05	2.94	3.03	2.93	3.00	2.92	2.97
19	2.93	3.12	2.90	3.05	2.89	3.01	2.88	2.98	2.87	2.97	2.86	2.93	2.85	2.91
20	2.86	3.06	2.83	3.00	2.83	2.95	2.81	2.92	2.80	2.91	2.79	2.87	2.79	2.84
21	2.80	3.01	2.77	2.93	2.76	2.89	2.74	2.86	2.74	2.85	2.73	2.81	2.72	2.78
22	2.74	2.96	2.71	2.88	2.70	2.84	2.68	2.81	2.68	2.80	2.67	2.76	2.66	2.73
23	2.68	2.91	2.65	2.83	2.64	2.79	2.62	2.76	2.62	2.74	2.61	2.70	2.59	2.67
24	2.63	2.87	2.60	2.78	2.59	2.74	2.57	2.71	2.56	2.69	2.55	2.65	2.54	2.62
25	2.58	2.83	2.54	2.74	2.54	2.69	2.52	2.67	2.51	2.65	2.50	2.60	2.49	2.57
26	2.53	2.79	2.50	2.70	2.49	2.65	2.47	2.62	2.46	2.61	2.45	2.56	2.44	2.53
27	2.48	2.75	2.45	2.66	2.44	2.61	2.42	2.58	2.41	2.57	2.40	2.52	2.39	2.49
28	2.43	2.72	2.40	2.63	2.39	2.57	2.37	2.54	2.37	2.53	2.35	2.48	2.34	2.45
29	2.39	2.69	2.36	2.59	2.35	2.54	2.33	2.51	2.32	2.49	2.31	2.44	2.30	2.41
30	2.34	2.65	2.31	2.56	2.30	2.50	2.28	2.47	2.28	2.45	2.26	2.41	2.25	2.37
31	2.30	2.62	2.27	2.52	2.26	2.47	2.24	2.43	2.24	2.42	2.22	2.37	2.21	2.34
32	2.26	2.59	2.23	2.49	2.22	2.43	2.20	2.40	2.19	2.38	2.18	2.33	2.17	2.30
33	2.22	2.56	2.19	2.46	2.18	2.40	2.16	2.37	2.15	2.35	2.14	2.30	2.13	2.27
34	2.18	2.53	2.15	2.43	2.14	2.37	2.12	2.33	2.12	2.32	2.10	2.27	2.09	2.24

Tabla A2.3 Factor de erosión en juntas con pasadores

Sin apoyo lateral.

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem
12	3.07	3.09	3.02	2.99	3.00	2.93	2.97	2.90	2.96	2.88	2.94	2.84	2.92	2.83
13	2.97	3.02	2.92	2.92	2.90	2.86	2.87	2.83	2.86	2.80	2.84	2.76	2.82	2.74
14	2.88	2.96	2.83	2.85	2.81	2.79	2.78	2.76	2.77	2.73	2.75	2.68	2.73	2.66
15	2.80	2.89	2.75	2.79	2.73	2.72	2.70	2.69	2.69	2.66	2.67	2.61	2.65	2.59
16	2.72	2.84	2.67	2.73	2.65	2.66	2.62	2.63	2.61	2.60	2.59	2.55	2.57	2.52
17	2.64	2.78	2.60	2.68	2.58	2.60	2.55	2.57	2.54	2.54	2.52	2.48	2.49	2.45
18	2.57	2.73	2.53	2.62	2.51	2.55	2.48	2.51	2.47	2.48	2.45	2.42	2.42	2.39
19	2.51	2.69	2.47	2.57	2.44	2.50	2.41	2.46	2.40	2.43	2.38	2.37	2.36	2.33
20	2.44	2.64	2.41	2.53	2.38	2.45	2.35	2.41	2.34	2.38	2.32	2.31	2.29	2.28
21	2.38	2.60	2.35	2.48	2.32	2.40	2.29	2.36	2.28	2.33	2.26	2.26	2.23	2.22
22	2.33	2.56	2.30	2.44	2.27	2.36	2.24	2.32	2.23	2.29	2.21	2.21	2.18	2.17
23	2.27	2.52	2.24	2.40	2.21	2.31	2.18	2.27	2.17	2.24	2.15	2.17	2.12	2.12
24	2.23	2.48	2.19	2.36	2.16	2.28	2.13	2.24	2.12	2.20	2.10	2.13	2.07	2.08
25	2.18	2.43	2.14	2.33	2.11	2.24	2.09	2.20	2.08	2.17	2.05	2.09	2.02	2.03
26	2.14	2.39	2.09	2.29	2.06	2.21	2.04	2.17	2.03	2.13	2.01	2.06	1.97	1.99
27	2.10	2.35	2.05	2.26	2.02	2.17	2.00	2.13	1.99	2.10	1.96	2.03	1.93	1.95
28	2.06	2.32	2.01	2.23	1.98	2.14	1.95	2.10	1.94	2.07	1.92	1.99	1.89	1.91
29	2.03	2.28	1.97	2.19	1.94	2.11	1.91	2.07	1.90	2.04	1.88	1.96	1.85	1.87
30	1.99	2.25	1.93	2.16	1.90	2.08	1.87	2.04	1.86	2.01	1.83	1.93	1.81	1.83
31	1.96	2.21	1.89	2.13	1.86	2.05	1.83	2.01	1.82	1.98	1.80	1.90	1.77	1.80
32	1.92	2.18	1.86	2.11	1.83	2.03	1.80	1.99	1.79	1.95	1.76	1.87	1.74	1.76
33	1.89	2.15	1.82	2.08	1.79	2.00	1.76	1.96	1.75	1.92	1.72	1.85	1.70	1.73
34	1.86	2.12	1.79	2.05	1.76	1.97	1.73	1.93	1.72	1.90	1.69	1.82	1.67	1.70

Tabla A2.4 Factor de erosión en juntas con pasadores
Con apoyo lateral.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple	Eje Tandem
12	3.72	3.82	3.69	3.74	3.67	3.69	3.65	3.67	3.64	3.65	3.62	3.61	3.59	3.58
13	3.62	3.75	3.59	3.66	3.57	3.61	3.55	3.59	3.54	3.57	3.52	3.52	3.49	3.49
14	3.53	3.68	3.50	3.59	3.48	3.53	3.46	3.51	3.45	3.49	3.43	3.44	3.40	3.41
15	3.45	3.61	3.41	3.52	3.39	3.46	3.37	3.44	3.36	3.42	3.34	3.37	3.31	3.34
16	3.37	3.55	3.33	3.46	3.31	3.40	3.29	3.37	3.28	3.35	3.26	3.30	3.23	3.26
17	3.30	3.50	3.26	3.40	3.23	3.34	3.21	3.31	3.20	3.29	3.18	3.23	3.16	3.20
18	3.23	3.44	3.18	3.34	3.16	3.28	3.14	3.25	3.13	3.23	3.11	3.17	3.09	3.13
19	3.17	3.39	3.12	3.29	3.09	3.23	3.07	3.19	3.06	3.17	3.04	3.11	3.02	3.07
20	3.11	3.35	3.05	3.24	3.03	3.17	3.01	3.14	3.00	3.12	2.98	3.05	2.96	3.02
21	3.05	3.30	2.99	3.19	2.97	3.13	2.95	3.09	2.94	3.07	2.92	3.00	2.90	2.96
22	3.00	3.26	2.94	3.15	2.91	3.08	2.89	3.04	2.88	3.02	2.86	2.95	2.84	2.91
23	2.94	3.22	2.88	3.11	2.85	3.03	2.83	2.99	2.82	2.97	2.80	2.90	2.78	2.86
24	2.90	3.18	2.84	3.07	2.80	2.99	2.78	2.95	2.77	2.93	2.75	2.86	2.73	2.82
25	2.86	3.14	2.79	3.03	2.76	2.96	2.73	2.91	2.72	2.89	2.70	2.82	2.68	2.78
26	2.81	3.11	2.75	2.99	2.71	2.92	2.69	2.88	2.68	2.86	2.65	2.78	2.63	2.74
27	2.77	3.08	2.70	2.96	2.67	2.89	2.64	2.84	2.63	2.82	2.61	2.75	2.59	2.71
28	2.73	3.05	2.66	2.93	2.62	2.85	2.60	2.81	2.59	2.79	2.56	2.71	2.54	2.67
29	2.70	3.02	2.62	2.90	2.58	2.82	2.56	2.78	2.55	2.75	2.52	2.68	2.50	2.64
30	2.66	2.99	2.59	2.86	2.54	2.79	2.51	2.75	2.50	2.72	2.48	2.64	2.46	2.60
31	2.63	2.96	2.55	2.83	2.50	2.76	2.48	2.72	2.47	2.69	2.44	2.61	2.42	2.57
32	2.59	2.93	2.51	2.81	2.47	2.73	2.44	2.69	2.43	2.66	2.40	2.58	2.38	2.54
33	2.56	2.90	2.48	2.78	2.43	2.70	2.40	2.66	2.39	2.63	2.36	2.55	2.34	2.51
34	2.53	2.88	2.45	2.75	2.40	2.67	2.37	2.63	2.36	2.60	2.32	2.52	2.30	2.48

Tabla A2.5 Factor de erosión en juntas sin pasadores

Sin apoyo lateral.

Espesor losa [cm.]	K - Módulo de reacción sub-rasante [Kg/cm ³]													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem	Eje Simple	Eje Tándem
12	3.25	3.29	3.20	3.19	3.18	3.13	3.17	3.11	3.16	3.09	3.13	3.04	3.11	3.03
13	3.16	3.23	3.11	3.12	3.09	3.06	3.08	3.04	3.06	3.02	3.03	2.97	3.01	2.95
14	3.08	3.17	3.03	3.06	3.00	2.99	2.99	2.97	2.98	2.95	2.95	2.90	2.93	2.87
15	3.00	3.11	2.95	3.00	2.92	2.93	2.91	2.91	2.90	2.88	2.87	2.83	2.85	2.80
16	2.93	3.06	2.88	2.94	2.85	2.88	2.84	2.85	2.82	2.82	2.79	2.77	2.77	2.74
17	2.87	3.01	2.81	2.89	2.78	2.82	2.77	2.79	2.75	2.77	2.72	2.71	2.70	2.68
18	2.80	2.97	2.74	2.84	2.71	2.77	2.70	2.74	2.69	2.71	2.66	2.65	2.64	2.62
19	2.74	2.92	2.68	2.80	2.65	2.72	2.64	2.69	2.62	2.66	2.59	2.60	2.57	2.57
20	2.69	2.88	2.62	2.76	2.59	2.68	2.58	2.64	2.56	2.62	2.53	2.55	2.51	2.51
21	2.63	2.84	2.57	2.71	2.53	2.64	2.52	2.60	2.51	2.57	2.48	2.50	2.46	2.47
22	2.58	2.80	2.51	2.68	2.48	2.59	2.47	2.56	2.45	2.53	2.42	2.46	2.40	2.42
23	2.53	2.77	2.46	2.64	2.43	2.55	2.42	2.51	2.40	2.48	2.37	2.41	2.35	2.37
24	2.48	2.74	2.42	2.60	2.38	2.52	2.37	2.48	2.36	2.45	2.33	2.38	2.31	2.33
25	2.44	2.71	2.37	2.57	2.34	2.49	2.33	2.45	2.31	2.42	2.28	2.34	2.26	2.29
26	2.40	2.68	2.33	2.54	2.30	2.46	2.28	2.41	2.27	2.38	2.24	2.31	2.22	2.25
27	2.36	2.65	2.29	2.51	2.26	2.43	2.24	2.38	2.22	2.35	2.20	2.27	2.17	2.21
28	2.33	2.62	2.25	2.49	2.22	2.40	2.20	2.35	2.18	2.32	2.16	2.24	2.13	2.18
29	2.29	2.60	2.22	2.46	2.18	2.37	2.16	2.33	2.14	2.30	2.12	2.21	2.09	2.14
30	2.26	2.57	2.18	2.43	2.15	2.35	2.12	2.30	2.11	2.27	2.08	2.18	2.06	2.11
31	2.22	2.55	2.15	2.41	2.11	2.32	2.09	2.27	2.07	2.24	2.04	2.15	2.02	2.07
32	2.19	2.52	2.11	2.38	2.08	2.29	2.05	2.25	2.03	2.22	2.01	2.13	1.98	2.04
33	2.16	2.50	2.08	2.36	2.04	2.27	2.02	2.22	2.00	2.19	1.98	2.10	1.95	2.01
34	2.13	2.48	2.05	2.34	2.01	2.25	1.98	2.20	1.97	2.17	1.94	2.07	1.92	1.98

Tabla A2.6 Factor de erosión en juntas sin pasadores

Con apoyo lateral.

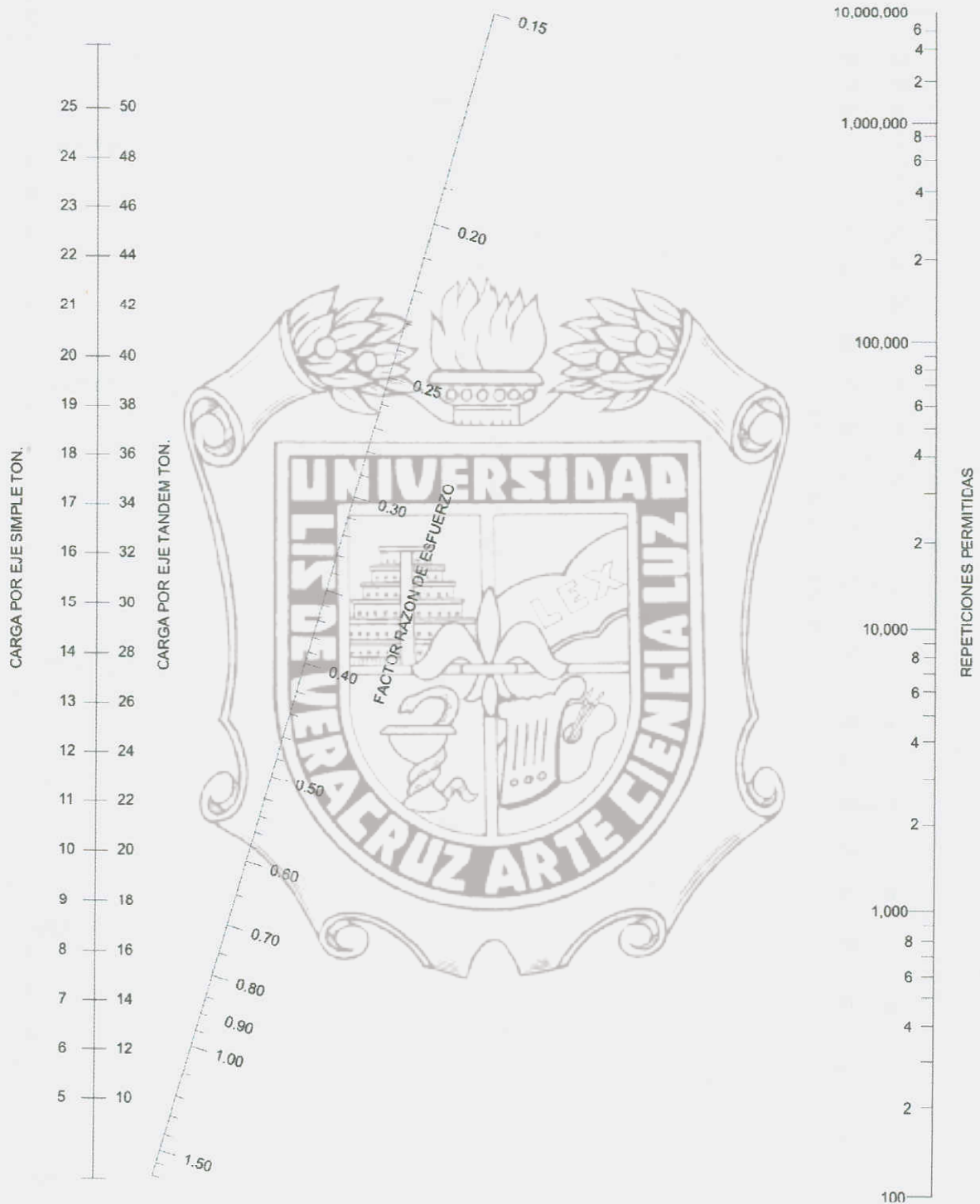


Figura A2.1. Método PCA (1984). Análisis por fatiga.

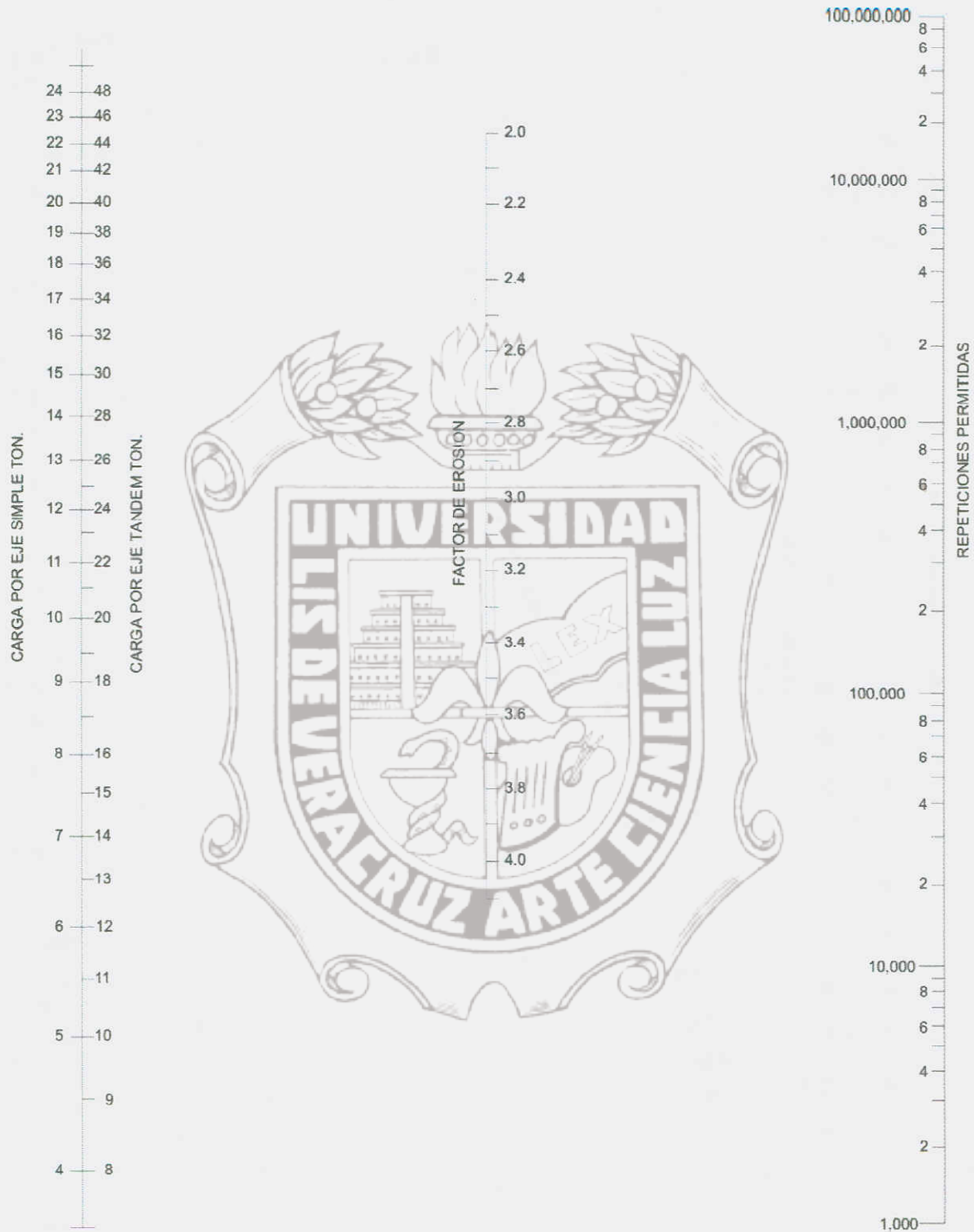


Figura A2.2. Método PCA (1984). Análisis por erosión – Sin apoyo lateral.

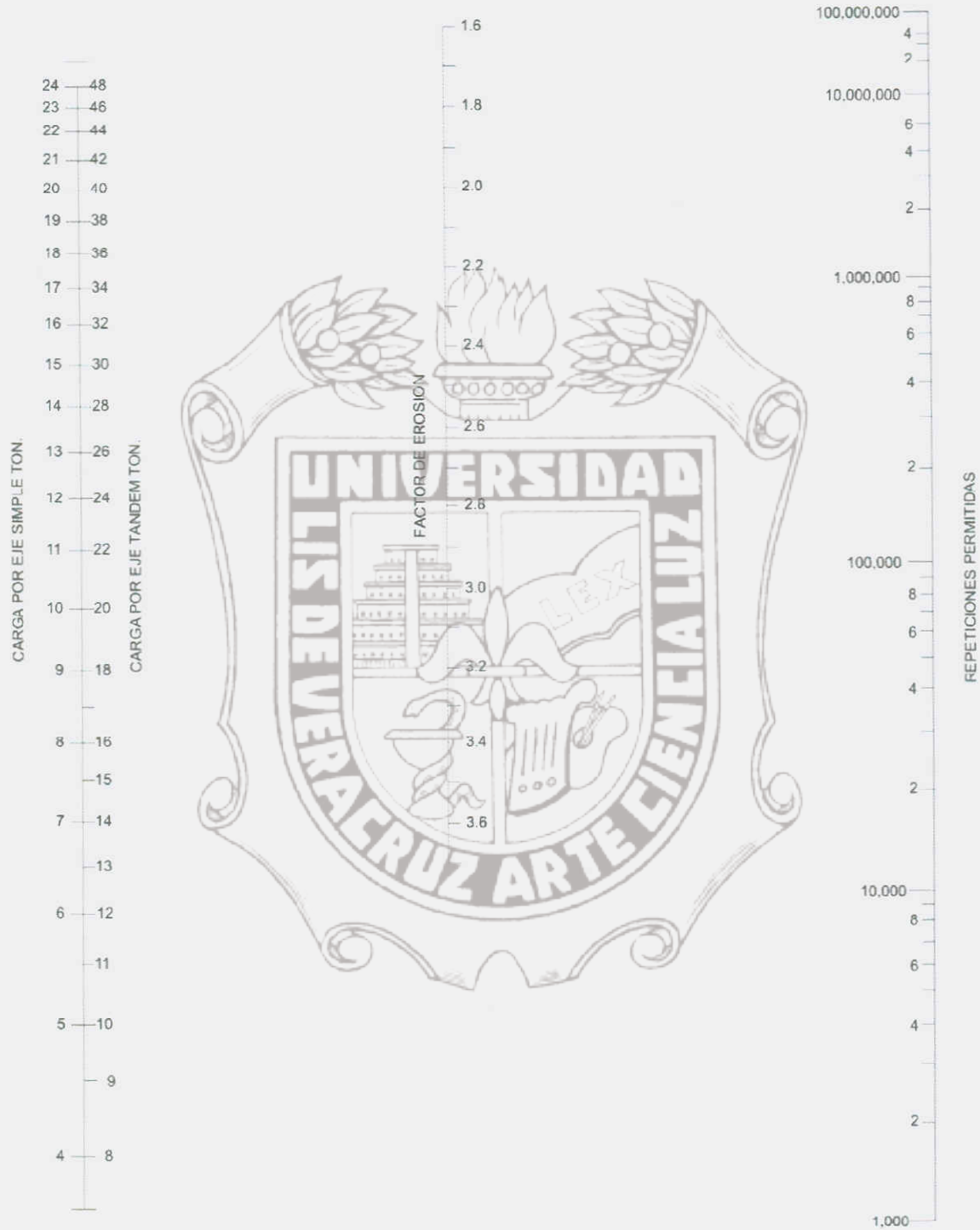




Figura A2.3. Método PCA (1984). Análisis por erosión – Con apoyo lateral.

Anexo 3. Porcentaje del TPDA para cada tipo de camión

 **A2**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	1	0.3
2	Sencillo	1	0.6
3			
4			
5			
SUMA		2.00	1.0

 **A*2**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	1.3	1.3
2	Sencillo	3.8	1.2
3			
4			
5			
SUMA		5.1	2.5

 **B2**


Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.5
2	Sencillo	16	7
3			
4			
5			
SUMA		21.50	10.50

 **B3**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	14	8
3			
4			
5			
SUMA		19.50	12.00

 **B4**


Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Tandem	7	5
2	Tandem	14	5
3			
4			
5			
SUMA		21.00	10.00

 **C2**


Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.5
2	Sencillo	10	3
3			
4			
5			
SUMA		15.50	6.50

 **C3**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3
2	Tandem	16	4.8
3			
4			
5			
SUMA		23.50	8.80

 **C4**


Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4.5
2	Tridem	22.5	4
3			
4			
5			
SUMA		28.00	12.50

 **T2-S1**


Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.2
2	Sencillo	10	3.4
3	Sencillo	10	3.4
4			
5			
SUMA		25.50	10.00

 **T2-S2**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Sencillo	10	3.5
3	Tandem	16	4
4			
5			
SUMA		31.50	11.50

 **T3-S2**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Tandem	18	4
4			
5			
SUMA		41.50	12.00

 **T3-S3**

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Tridem	22.5	5
4			
5			
SUMA		46.00	13



C2-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.5
2	Sencillo	10	3
3	Sencillo	10	2
4	Sencillo	10	2
SUMA		35.50	10.50



C3-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4.5
3	Sencillo	10	2
4	Sencillo	10	2
5			
SUMA		43.50	12.50



C3-R3

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4.5
3	Sencillo	10	2
4	Tandem	18	3
5			
SUMA		51.50	13.50



T2-S1-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	3.2
2	Sencillo	10	3.4
3	Sencillo	10	2.4
4	Sencillo	10	2.5
5	Sencillo	10	2.2
SUMA		45.50	13.50



T2-S2-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Sencillo	10	4
3	Tandem	10	3.5
4	Sencillo	10	2.3
5	Sencillo	10	2.2
SUMA		45.50	16.50



T3-S1-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Sencillo	10	2.5
4	Sencillo	10	2.3
5	Sencillo	10	2.2
SUMA		53.50	15.00



T3-S2-R2

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Tandem	18	3.5
4	Sencillo	10	2.3
5	Sencillo	10	2.2
SUMA		61.50	16.00



T3-S2-R3

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Tandem	18	3.5
4	Sencillo	10	2.3
5	Tandem	18	3.2
SUMA		69.50	17.00



T3-S2-R4

Conjunto		Peso	
		Carga Máxima	Vacio
Nro.	Tipo	Ton	Ton
1	Sencillo	5.5	4
2	Tandem	18	4
3	Tandem	18	3.5
4	Tandem	18	3.3
5	Tandem	18	3.2
SUMA		77.50	18.00

Anexo 4. Normas de ensayo a las que se hace referencia en la investigación

Normas de la ASTM (American Society For Testing and Materials)

ASTM C 33: Standard Specification for Concrete Aggregates (Especificación Estándar para los agregados del concreto)

ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (Método de ensayo estándar de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto).

ASTM C 78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading); (Método de ensayo estándar de resistencia a la flexión del concreto (usando una viga simple cargada en los tercios del tramo).

ASTM C 94: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete; (Especificación normativa para la adición de agua en el concreto premezclado).

ASTM C 136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (Método de ensayo estándar para análisis de agregados finos y gruesos mediante tamices)

ASTM C 143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete (Método de ensayo estándar de asentamiento del concreto de cemento hidráulico)

ASTM C 150: Standard Specification for Portland Cement (Especificación estándar para el cemento Portland)

ASTM C 172: Standard Test Method for Sampling Fresh Concrete (Método de ensayo estándar de una muestra de concreto fresco)

ASTM C 192: Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (Práctica estándar para conformar y curar especímenes de concreto para su ensayo en el laboratorio).

ASTM C 295-98: Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete (Guía estándar para el examen petrográfico de los agregados para concreto)

ASTM C 496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (Método de ensayo estándar para encontrar la resistencia a la tensión mediante la hendidura de especímenes cilíndricos de concreto)

ASTM C 511: Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cement and Concretes (Especificación estándar para cuartos húmedos, cámaras de curado y tanques de almacenamiento de agua para curado de especímenes de concreto)

Anexos

ASTM C 566: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying (Método de ensayo estándar mediante secado del contenido total de humedad evaporable del agregado)

ASTM 617: Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens (Método de ensayo estándar para cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto)

ASTM C 1077-02: Standard Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation (Práctica estándar para ensayo en laboratorio del concreto y de los agregados para uso en construcción y criterios para su evaluación en el laboratorio)

ASTM C 1116: Standard Specification Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete (Especificación estándar para concretos reforzados con fibras sintéticas)



Anexo 5. Recomendaciones del IMCYC para concretos fibroreforzados

Al agregar pequeñas cantidades de fibras, el concreto se enriquece con el incremento de algunas propiedades. Quien opte por este tipo de refuerzo del material debe saber que, si bien los procedimientos de producción y construcción no difieren mucho de lo acostumbrado, hay que tomar ciertos recaudos durante los procesos de mezclado, colocación y acabado para obtener los resultados óptimos.

A continuación se enuncian algunas de las recomendaciones proporcionadas por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto para el uso de mezclas de concreto que contengan fibras sintéticas en general.

1.- Mezclado

Las fibras PP se empacan, de manera suelta, en bolsas degradables que pueden agregarse a la mezcla en la planta de dosificación o echarse al camión mezclador en el lugar de la obra. Sin embargo, los fabricantes recomiendan mucho agregar las fibras en una planta de dosificación confiable, al menos por dos razones.

- Primero, esto proporciona una medida adicional de control.
- Y segundo, es muy importante que las fibras sintéticas se mezclen por lo menos de tres a cinco minutos, algo que no siempre es posible en el lugar de la obra.

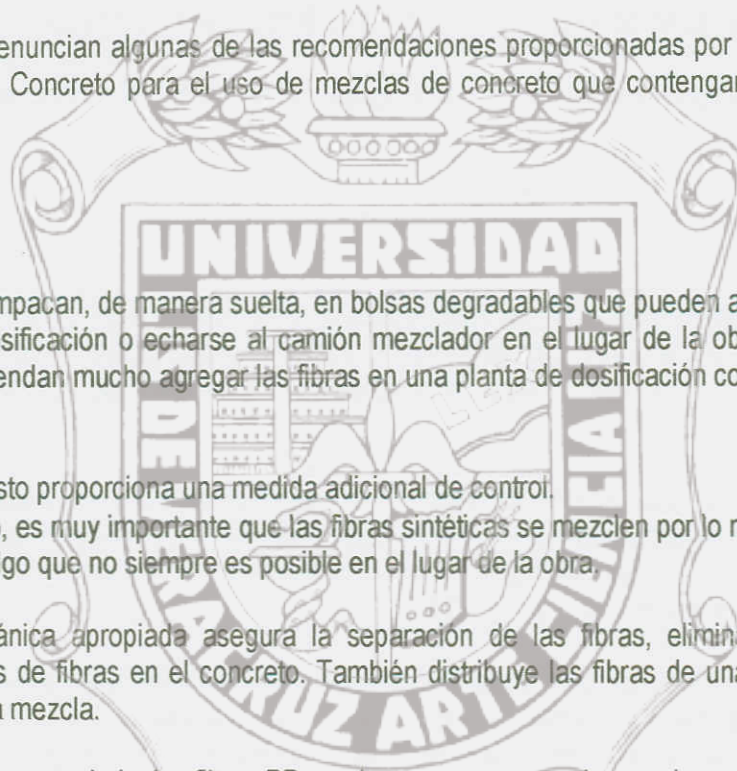
La agitación mecánica apropiada asegura la separación de las fibras, eliminando virtualmente la formación de bolas de fibras en el concreto. También distribuye las fibras de una manera completa y uniforme en toda la mezcla.

En las plantas de premezclado, las fibras PP pueden precargarse en los camiones de concreto antes de agregar los otros materiales de la mezcla. En muchos casos, las fibras se añaden a la corriente de agregados durante los procedimientos normales de dosificación, o se cargan en la cola del camión después que todos los otros componentes del concreto han sido agregados.

Para acelerar los procedimientos de dosificación, es ligeramente más ventajoso agregar las fibras PP a los camiones antes de la dosificación del concreto o con la corriente de agregados.

Si las fibras se cargan al final, o se agregan en el lugar de la obra, se requerirán aproximadamente dos minutos para introducir las fibras en el camión, y cuatro minutos de tiempo adicional para el mezclado, a fin de distribuir las fibras en todo el concreto.

El mezclado de fibras PP requiere mucho cuidado para evitar el desarrollo de bolas de fibras en el concreto fresco. No agregue fibras a la mezcladora más rápidamente de lo que ésta pueda jalarlas hacia el tambor mezclador. Puesto que se sabe que estas fibras son susceptibles de formar amasijos si



caen unas sobre otras, y se amontonan en la banda transportadora del agregado o en las aspas de la mezcladora, el Comité 544 del ACI recomienda tomar las siguientes precauciones:

- Permitir que el ingeniero del proyecto revise y apruebe el equipo y el método utilizado para agregar las fibras a la mezcla.
- Efectuar una prueba a gran escala, al menos ocho días antes de la primera colocación.
- No permitir que las fibras se apilen o se deslicen hacia abajo de las aspas de un tambor parcialmente lleno.
- No usar equipo con las aspas de mezclado desgastadas.
- No sobremezclar, ya que esto puede causar la formación de bolas de fibras mojadas (compuestas tanto de fibras como de la matriz de la pasta de cemento).

Sin embargo, conviene consultar a los productores de las fibras para obtener la información más reciente.

2.- Colocación

El concreto reforzado con fibras PP se pueden colocar empleando equipo convencional de colocación tal como canaletas de camión, cubos de concreto, bandas transportadoras y bombas. El equipo debe estar limpio y en buenas condiciones para asegurar que el concreto reforzado con fibras fluya fácilmente.

Si se agregan pequeños volúmenes de fibras PP se reduce el revenimiento, haciendo que el concreto bien proporcionado parezca más rígido y menos trabajable. Por lo que el constructor debe esperar esto y resistir la tentación de agregar agua, lo que incrementaría la relación agua-cemento y bajaría la resistencia de diseño del concreto endurecido.

Aunque el concreto reforzado con fibras PP parezca más rígido, es relativamente fácil de colocar y consolidar. Si se desea mejor trabajabilidad, es conveniente ajustar la granulometría del agregado y agregar un reductor de agua de mediano o alto rango a la mezcla en vez de agua.

En cuanto al equipo de manipulación Al igual que con el concreto convencional, se puede utilizar el empleo de palas planas o azadones especiales para concreto, y nunca emplear rastrillos de jardín (con cinco o seis dientes) para moverlo.

3.- Acabado

Aunque las operaciones de acabado del concreto reforzado con fibras PP son muy similares a las utilizadas para concreto simple, existen algunas diferencias. Es conveniente usar los siguientes procedimientos para producir una superficie satisfactoria.

a. Operaciones de enrase. Una clave para el acabado del concreto reforzado con fibras PP es usar vibración externa del molde o cimbra con una regla vibratoria, enrasadora eléctrica portátil o enrasadora guiada por láser, para nivelar el concreto.

En algunas obras, este paso puede ser esencial. La vibración externa hace que la pasta salga a la superficie y cubra las fibras PP localizadas en la superficie de la losa del pavimento, encapsulándolas en el concreto y minimizando así la exposición de las fibras. Si la vibración externa no es práctica para la aplicación, se debe asegurar de dejar en la superficie una capa de mortero que sea lo suficientemente gruesa para cubrir las fibras.

b. Enrasado y operaciones de nivelado. Al igual que en el caso del concreto con aire incluido, no es conveniente el empleo de utilice llanas u otras herramientas de madera, ya que pueden rasgar la superficie de concreto. Se debe utilizar mejor llanas de magnesio, que hacen un trabajo especialmente bueno para establecer una superficie de gran calidad, cerrando cualesquiera áreas abiertas o rotas a causa de la enrasadora.

Asimismo, se debe tener cuidado de no sobretrabajar la superficie, ya que esto haría aparecer excesivos finos en la misma, que podrían provocar grietas menudas. Si en la superficie hay agua de sangrado o finos excesivos, el material debe quitarse con la enrasadora y descartarse.

c. Periodo de espera. Los millones de fibras PP en el concreto pueden bloquear o retardar la aparición de agua de sangrado en la superficie. Por lo tanto, hay que asegurarse de que toda el agua de sangrado se haya evaporado antes de pisar sobre el concreto. Puesto que el concreto reforzado con fibras PP no parece nada diferente del concreto simple, se trata simplemente de esperar un poco más tiempo que el de costumbre.

Pero si acabadores inexpertos interpretan erróneamente la falta del agua de sangrado como un signo de que ha ocurrido el fraguado inicial, pueden pisar sobre el concreto demasiado pronto, incrementando la posibilidad de problemas tales como fibras expuestas y delaminación.

Por lo tanto, el tiempo necesario para el acabado del concreto reforzado con fibras PP es el mismo que para el concreto simple, y las prácticas de acabado no deben ser afectadas significativamente.

d. Operaciones finales de nivelado. Para el allanado final, es conveniente usar llanas de magnesio o herramientas mecánicas. Se debe mantener las herramientas manuales en lo plano (no en los bordes), y moverlas con un movimiento de aserrado (movimientos rápidos, cortos hacia adelante y hacia atrás) al pasarlas a través de la superficie. Al aplanado con llana de madera puede seguir un allanado con acero duro si se desea una superficie lisa, pero si la persona que realiza el trabajo, no mantiene plana la llana, hará que aparezcan fibras PP en la superficie.

Durante cada pasada del allanado con herramienta eléctrica, es común ver que las fibras PP salten de la superficie de concreto debido a las hojas de acabado. Estas fibras deben quitarse de la superficie de la losa de los pavimentos antes del siguiente allanado mecánico.

Para lograr el objetivo anterior, es conveniente adaptar imanes a las llanas mecánicas para ayudar a recoger las fibras y evitar que vuelvan a caer en la superficie del pavimento. Después de allanar la superficie, se debe esperar hasta que pueda hacerse el acabado final sin dañar el concreto, lo cual sucede generalmente en el momento del fraguado inicial.

e. Operaciones finales de acabado. Las fibras PP son compatibles con casi todos los tratamientos y acabados de las superficies de concreto, incluyendo estampado de patrones, agregado expuesto, escobillado y allanado manual o mecánico.

El uso de manta de yute para texturizar el concreto no se recomienda por lo regular en el concreto reforzado con fibras PP, ya que es muy probable que la manta de yute levante las fibras y rompa la superficie.

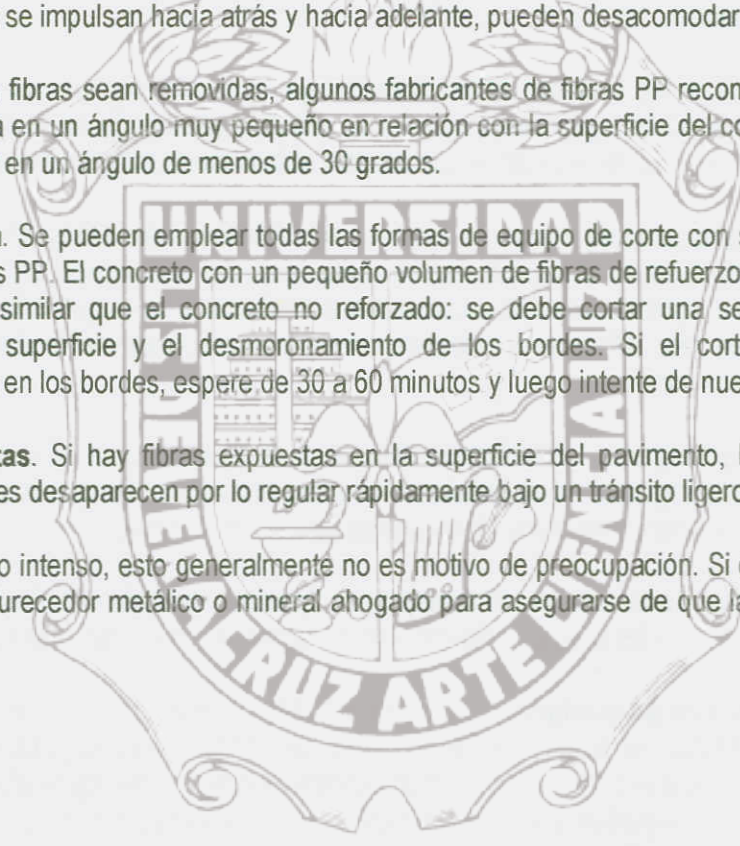
Si se desea una superficie texturizada, se puede utilizar una escoba con cerdas duras o un rastrillo texturizador (con aproximadamente 60 puntas), a condición de que se pase en una sola dirección. Si el rastrillo o la escoba se impulsan hacia atrás y hacia adelante, pueden desacomodar las fibras.

Para evitar que las fibras sean removidas, algunos fabricantes de fibras PP recomiendan mantener el rastrillo o la escoba en un ángulo muy pequeño en relación con la superficie del concreto; las cerdas o puntas deben estar en un ángulo de menos de 30 grados.

f. Corte con sierra. Se pueden emplear todas las formas de equipo de corte con sierra en el concreto reforzado con fibras PP. El concreto con un pequeño volumen de fibras de refuerzo se puede cortar con sierra de manera similar que el concreto no reforzado: se debe cortar una sección y evaluar las astilladuras de la superficie y el desmoronamiento de los bordes. Si el corte con sierra causa desmoronamientos en los bordes, espere de 30 a 60 minutos y luego intente de nuevo.

g. Fibras expuestas. Si hay fibras expuestas en la superficie del pavimento, las fibras PP al ser relativamente suaves desaparecen por lo regular rápidamente bajo un tránsito ligero mediante cepillado.

En áreas de tránsito intenso, esto generalmente no es motivo de preocupación. Si causa problemas, se puede usar un endurecedor metálico o mineral ahogado para asegurarse de que las fibras PP no sean visibles.



Anexo 6. Resultados de las corridas estructurales

RAM Advanse

File : C:\AutoCAD 2006\Lorena\Pavimento 3.AVV
 Units system : Metric
 Date : 22/04/2006 04:41:41 p.m.

Geometry data

GLOSSARY

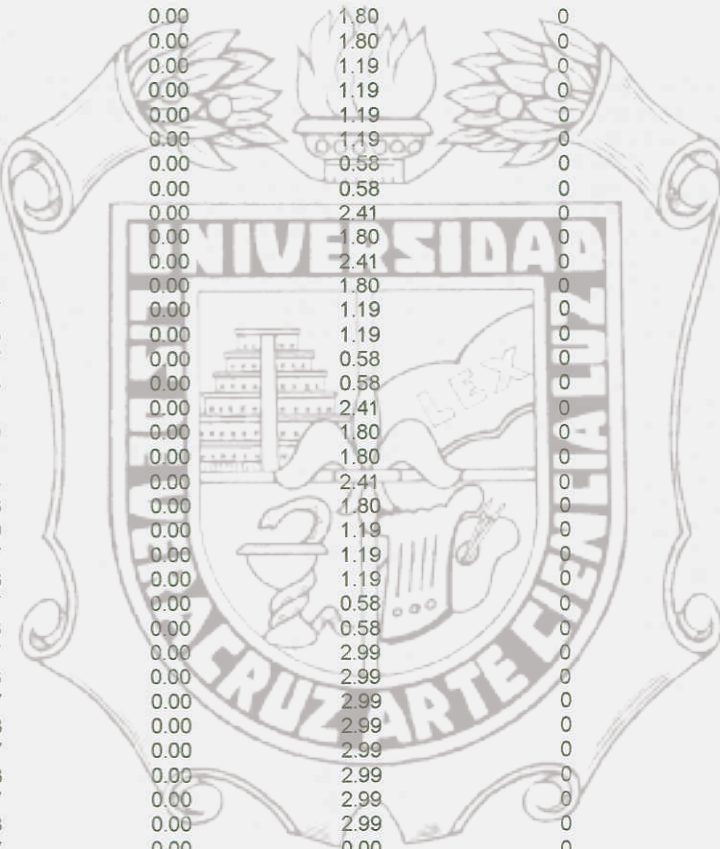
Cm22 : Coefficient about axis 2 applied to bending term in interaction equation (H1)
 Cm33 : Coefficient about axis 3 applied to bending term in interaction equation (H1)
 d0 : Tapered member section depth at J end of member
 DJX : Rigid end offset distance measured from J node in axis X
 DJY : Rigid end offset distance measured from J node in axis Y
 DJZ : Rigid end offset distance measured from J node in axis Z
 DKX : Rigid end offset distance measured from K node in axis X
 DKY : Rigid end offset distance measured from K node in axis Y
 DKZ : Rigid end offset distance measured from K node in axis Z
 dL : Tapered member section depth at K end of member
 Ig factor : Inertia reduction factor (Effective Inertia/Gross Inertia) for reinforced concrete members
 K22 : Effective length factor about axis 2
 K33 : Effective length factor about axis 3
 L22 : Member length for calculation of axial capacity
 L33 : Member length for calculation of axial capacity
 Lb : Unbraced length between lateral supports to resist lateral torsional bucking
 RX : Rotation about X
 RY : Rotation about Y
 RZ : Rotation about Z
 TO : 1 = Tension only member 0 = Normal member
 TX : Translation in X
 TY : Translation in Y
 TZ : Translation in Z

Nodes

Node	X [M]	Y [M]	Z [M]	Floor
1	0.00	0.00	0.00	0
2	2.00	0.00	0.00	0
3	4.00	0.00	0.00	0
4	6.27	0.00	0.00	0
5	8.00	0.00	0.00	0
6	0.00	0.00	0.58	0
7	2.00	0.00	0.58	0
8	4.00	0.00	0.58	0
9	6.27	0.00	0.58	0
10	8.00	0.00	0.58	0
11	0.00	0.00	2.41	0
12	2.00	0.00	2.41	0
13	4.00	0.00	2.41	0
14	6.27	0.00	2.41	0
15	8.00	0.00	2.41	0
21	0.00	0.00	2.99	0
22	2.00	0.00	2.99	0
23	4.00	0.00	2.99	0
24	6.27	0.00	2.99	0
25	8.00	0.00	2.99	0

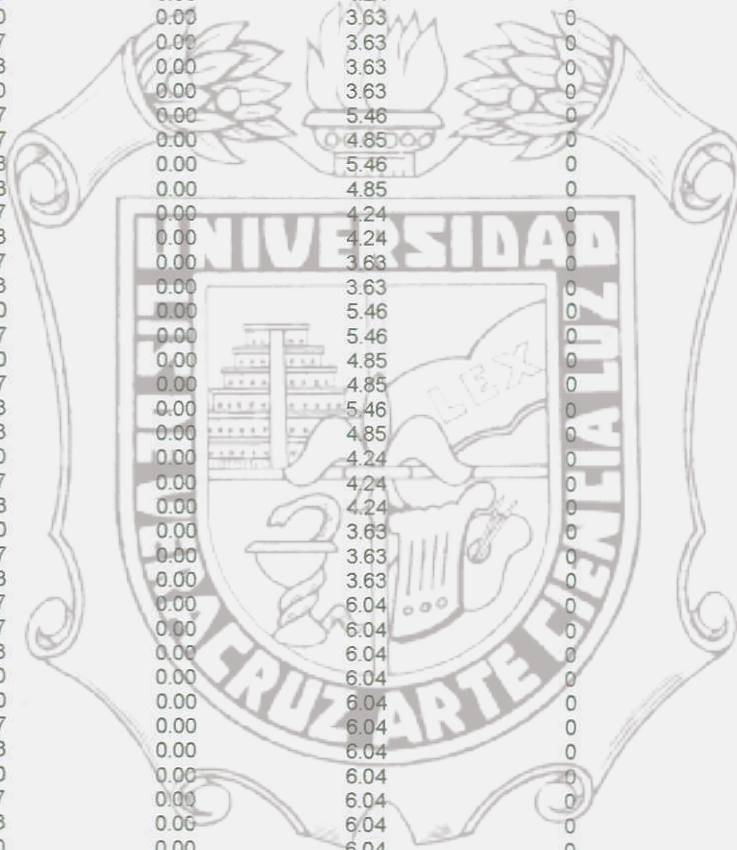
Anexos

26	6.8467	0.00	2.41	0
27	6.27	0.00	1.80	0
28	6.8467	0.00	1.80	0
29	7.4233	0.00	2.41	0
30	7.4233	0.00	1.80	0
31	8.00	0.00	1.80	0
32	6.27	0.00	1.19	0
33	6.8467	0.00	1.19	0
34	7.4233	0.00	1.19	0
35	8.00	0.00	1.19	0
36	6.8467	0.00	0.58	0
37	7.4233	0.00	0.58	0
38	2.6667	0.00	2.41	0
39	2.00	0.00	1.80	0
40	2.6667	0.00	1.80	0
41	3.3333	0.00	2.41	0
42	3.3333	0.00	1.80	0
43	4.00	0.00	1.80	0
44	2.00	0.00	1.19	0
45	2.6667	0.00	1.19	0
46	3.3333	0.00	1.19	0
47	4.00	0.00	1.19	0
48	2.6667	0.00	0.58	0
49	3.3333	0.00	0.58	0
50	4.7567	0.00	2.41	0
51	4.7567	0.00	1.80	0
52	5.5133	0.00	2.41	0
53	5.5133	0.00	1.80	0
54	4.7567	0.00	1.19	0
55	5.5133	0.00	1.19	0
56	4.7567	0.00	0.58	0
57	5.5133	0.00	0.58	0
58	0.6667	0.00	2.41	0
59	0.00	0.00	1.80	0
60	0.6667	0.00	1.80	0
61	1.3333	0.00	2.41	0
62	1.3333	0.00	1.80	0
63	0.00	0.00	1.19	0
64	0.6667	0.00	1.19	0
65	1.3333	0.00	1.19	0
66	0.6667	0.00	0.58	0
67	1.3333	0.00	0.58	0
68	6.8467	0.00	2.99	0
69	7.4233	0.00	2.99	0
70	4.7567	0.00	2.99	0
71	5.5133	0.00	2.99	0
72	2.6667	0.00	2.99	0
73	3.3333	0.00	2.99	0
74	0.6667	0.00	2.99	0
75	1.3333	0.00	2.99	0
76	6.8467	0.00	0.00	0
77	7.4233	0.00	0.00	0
78	4.7567	0.00	0.00	0
79	5.5133	0.00	0.00	0
80	2.6667	0.00	0.00	0
81	3.3333	0.00	0.00	0
82	0.6667	0.00	0.00	0
83	1.3333	0.00	0.00	0
84	6.27	0.00	5.46	0
85	6.8467	0.00	5.46	0
86	6.27	0.00	4.85	0
87	6.8467	0.00	4.85	0
88	7.4233	0.00	5.46	0
89	7.4233	0.00	4.85	0
90	8.00	0.00	5.46	0
91	8.00	0.00	4.85	0
92	6.27	0.00	4.24	0
93	6.8467	0.00	4.24	0
94	7.4233	0.00	4.24	0
95	8.00	0.00	4.24	0



Anexos

96	6.27	0.00	3.63	0
97	6.8467	0.00	3.63	0
98	7.4233	0.00	3.63	0
99	8.00	0.00	3.63	0
100	2.00	0.00	5.46	0
101	2.6667	0.00	5.46	0
102	2.00	0.00	4.85	0
103	2.6667	0.00	4.85	0
104	3.3333	0.00	5.46	0
105	3.3333	0.00	4.85	0
106	4.00	0.00	5.46	0
107	4.00	0.00	4.85	0
108	2.00	0.00	4.24	0
109	2.6667	0.00	4.24	0
110	3.3333	0.00	4.24	0
111	4.00	0.00	4.24	0
112	2.00	0.00	3.63	0
113	2.6667	0.00	3.63	0
114	3.3333	0.00	3.63	0
115	4.00	0.00	3.63	0
116	4.7567	0.00	5.46	0
117	4.7567	0.00	4.85	0
118	5.5133	0.00	5.46	0
119	5.5133	0.00	4.85	0
120	4.7567	0.00	4.24	0
121	5.5133	0.00	4.24	0
122	4.7567	0.00	3.63	0
123	5.5133	0.00	3.63	0
124	0.00	0.00	5.46	0
125	0.6667	0.00	5.46	0
126	0.00	0.00	4.85	0
127	0.6667	0.00	4.85	0
128	1.3333	0.00	5.46	0
129	1.3333	0.00	4.85	0
130	0.00	0.00	4.24	0
131	0.6667	0.00	4.24	0
132	1.3333	0.00	4.24	0
133	0.00	0.00	3.63	0
134	0.6667	0.00	3.63	0
135	1.3333	0.00	3.63	0
136	6.27	0.00	6.04	0
137	6.8467	0.00	6.04	0
138	7.4233	0.00	6.04	0
139	8.00	0.00	6.04	0
140	4.00	0.00	6.04	0
141	4.7567	0.00	6.04	0
142	5.5133	0.00	6.04	0
143	2.00	0.00	6.04	0
144	2.6667	0.00	6.04	0
145	3.3333	0.00	6.04	0
146	0.00	0.00	6.04	0
147	0.6667	0.00	6.04	0
148	1.3333	0.00	6.04	0
149	6.27	0.00	3.05	0
150	6.8467	0.00	3.05	0
151	7.4233	0.00	3.05	0
152	8.00	0.00	3.05	0
153	4.00	0.00	3.05	0
154	4.7567	0.00	3.05	0
155	5.5133	0.00	3.05	0
156	2.00	0.00	3.05	0
157	2.6667	0.00	3.05	0
158	3.3333	0.00	3.05	0
159	0.00	0.00	3.05	0
160	0.6667	0.00	3.05	0
161	1.3333	0.00	3.05	0



Anexos

Restraints

Node	TX	TY	TZ	RX	RY	RZ
1	1	0	1	0	0	0
5	1	0	1	0	0	0
139	1	0	1	0	0	0
146	1	0	1	0	0	0

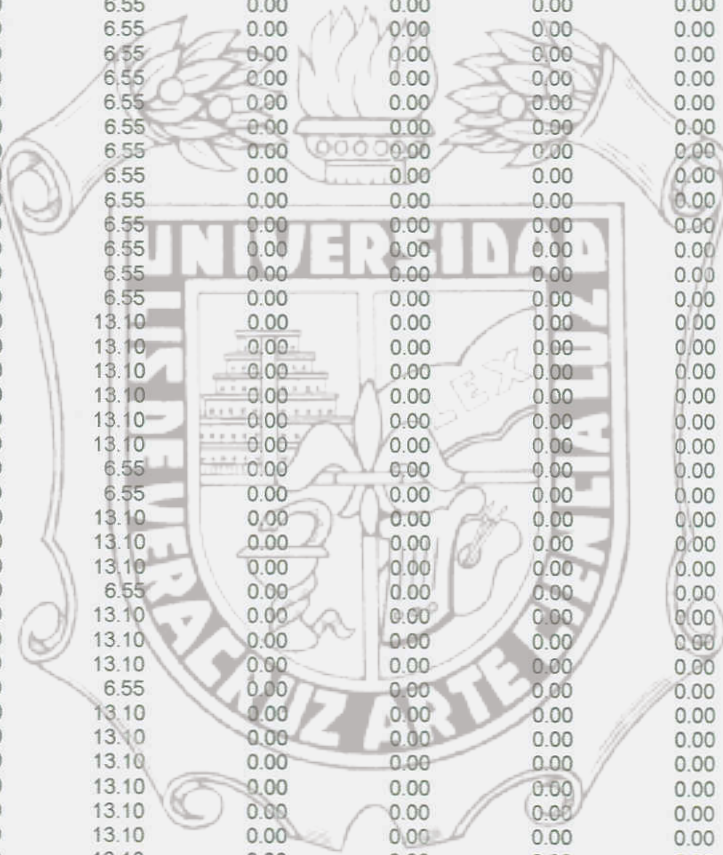
Springs

Node	TX [Ton/cm]	TY [Ton/cm]	TZ [Ton/cm]	RX [Ton*M/rad]	RY [Ton*M/rad]	RZ [Ton*M/rad]
1	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
34	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
38	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
39	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
41	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
43	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
44	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
46	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
47	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
48	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
49	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
51	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
52	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
53	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
54	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
55	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00

Instituto de Ingeniería
 Universidad Veracruzana

Anexos

56	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
57	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
58	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
59	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
61	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
62	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
63	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
64	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
66	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
67	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
68	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
69	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
71	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
72	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
74	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
75	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
76	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
77	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
78	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
79	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
81	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
82	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
83	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
84	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
85	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
86	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
87	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
88	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
89	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
91	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
92	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
93	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
94	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
95	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
96	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
97	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
98	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
99	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
101	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
102	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
103	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
104	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
105	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
106	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
107	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
108	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
109	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
110	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
111	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
112	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
113	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
114	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
115	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
116	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
117	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
118	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
119	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
121	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
122	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
123	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
124	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
125	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00



Anexos

126	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
127	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
128	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
129	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
131	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
132	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
133	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
134	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
135	0.00	13.10	0.00	0.00	0.00	0.00
136	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
137	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
138	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
139	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
140	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
141	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
142	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
143	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
144	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
145	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
146	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
147	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
148	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
149	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
151	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
152	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
153	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
154	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
155	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
156	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
157	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
158	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
159	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	0.00
160	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00
161	0.00	6.55	0.00	0.00	0.00	0.00

Members

Beam	NJ	NK	Description	Section	Material	d0 [cm]	dL [cm]
1	159	21	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
2	160	74	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
3	161	75	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
4	153	23	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
5	154	70	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
6	155	71	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
7	149	24	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
8	150	68	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
9	151	69	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
10	152	25	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
11	156	22	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
12	157	72	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00
13	158	73	Barra	RndBar 3_4	SteelA36	0.00	0.00

Anexos

Shells

Shell	N1	N2	N3	N4	Description	Material	Thickness [cm]
13	14	26	27	28		RC\H 250x5000	15.00
14	26	29	28	30		RC\H 250x5000	15.00
15	29	15	30	31		RC\H 250x5000	15.00
16	27	28	32	33		RC\H 250x5000	15.00
17	28	30	33	34		RC\H 250x5000	15.00
18	30	31	34	35		RC\H 250x5000	15.00
19	32	33	9	36		RC\H 250x5000	15.00
20	33	34	36	37		RC\H 250x5000	15.00
21	34	35	37	10		RC\H 250x5000	15.00
22	12	38	39	40		RC\H 250x5000	15.00
23	38	41	40	42		RC\H 250x5000	15.00
24	41	13	42	43		RC\H 250x5000	15.00
25	39	40	44	45		RC\H 250x5000	15.00
26	40	42	45	46		RC\H 250x5000	15.00
27	42	43	46	47		RC\H 250x5000	15.00
28	44	45	7	48		RC\H 250x5000	15.00
29	45	46	48	49		RC\H 250x5000	15.00
30	46	47	49	8		RC\H 250x5000	15.00
31	13	50	43	51		RC\H 250x5000	15.00
32	50	52	51	53		RC\H 250x5000	15.00
33	52	14	53	27		RC\H 250x5000	15.00
34	43	51	47	54		RC\H 250x5000	15.00
35	51	53	54	55		RC\H 250x5000	15.00
36	53	27	55	32		RC\H 250x5000	15.00
37	47	54	8	56		RC\H 250x5000	15.00
38	54	55	56	57		RC\H 250x5000	15.00
39	55	32	57	9		RC\H 250x5000	15.00
40	11	58	59	60		RC\H 250x5000	15.00
41	58	61	60	62		RC\H 250x5000	15.00
42	61	12	62	39		RC\H 250x5000	15.00



Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

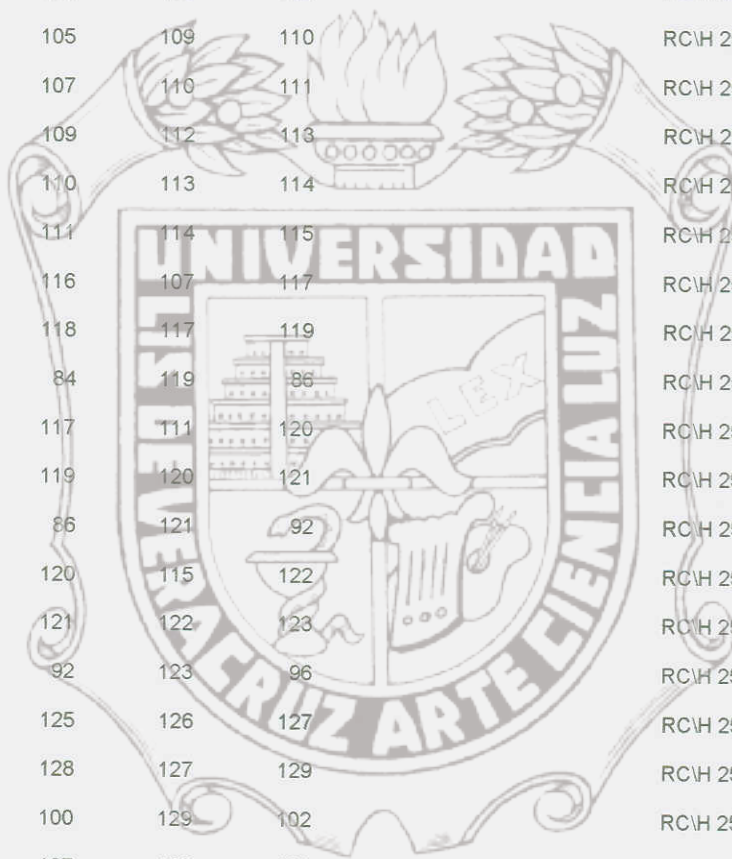
Anexos

43	59	60	63	64	RC\H 250x5000	15.00
44	60	62	64	65	RC\H 250x5000	15.00
45	62	39	65	44	RC\H 250x5000	15.00
46	63	64	6	66	RC\H 250x5000	15.00
47	64	65	66	67	RC\H 250x5000	15.00
48	65	44	67	7	RC\H 250x5000	15.00
49	24	68	14	26	RC\H 250x5000	15.00
50	68	69	26	29	RC\H 250x5000	15.00
51	69	25	29	15	RC\H 250x5000	15.00
52	23	70	13	50	RC\H 250x5000	15.00
53	70	71	50	52	RC\H 250x5000	15.00
54	71	24	52	14	RC\H 250x5000	15.00
55	22	72	12	38	RC\H 250x5000	15.00
56	72	73	38	41	RC\H 250x5000	15.00
57	73	23	41	13	RC\H 250x5000	15.00
58	21	74	11	58	RC\H 250x5000	15.00
59	74	75	58	61	RC\H 250x5000	15.00
60	75	22	61	12	RC\H 250x5000	15.00
61	9	36	4	76	RC\H 250x5000	15.00
62	36	37	76	77	RC\H 250x5000	15.00
63	37	10	77	5	RC\H 250x5000	15.00
64	8	56	3	78	RC\H 250x5000	15.00
65	56	57	78	79	RC\H 250x5000	15.00
66	57	9	79	4	RC\H 250x5000	15.00
67	7	48	2	80	RC\H 250x5000	15.00
68	48	49	80	81	RC\H 250x5000	15.00
69	49	8	81	3	RC\H 250x5000	15.00
70	6	66	1	82	RC\H 250x5000	15.00
71	66	67	82	83	RC\H 250x5000	15.00
72	67	7	83	2	RC\H 250x5000	15.00
73	84	85	86	87	RC\H 250x5000	15.00
74	85	88	87	89	RC\H 250x5000	15.00
75	88	90	89	91	RC\H 250x5000	15.00
76	86	87	92	93	RC\H 250x5000	15.00
77	87	89	93	94	RC\H 250x5000	15.00



Anexos

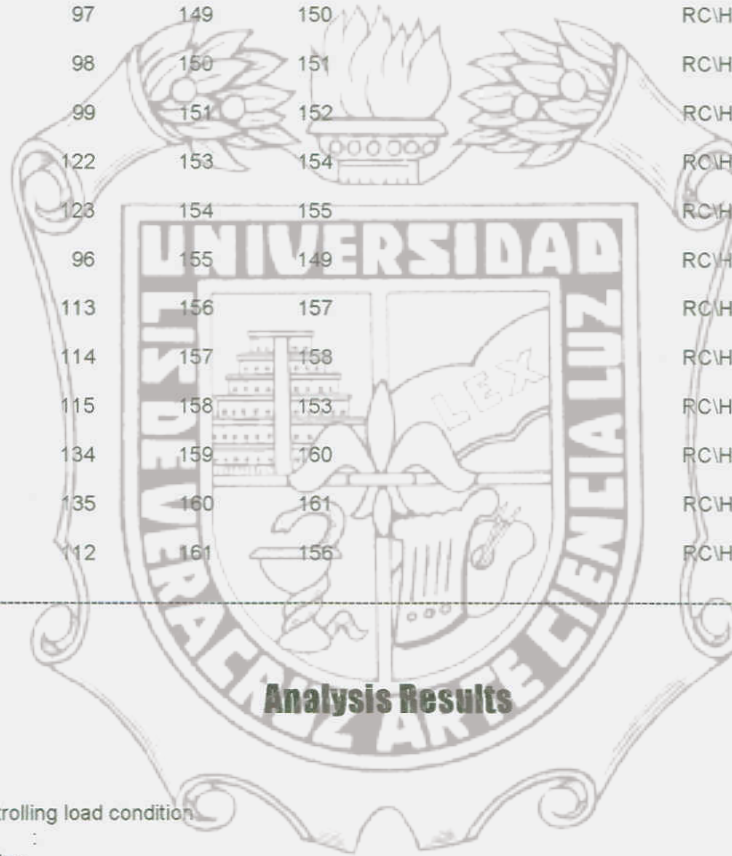
78	89	91	94	95	RC\H 250x5000	15.00
79	92	93	96	97	RC\H 250x5000	15.00
80	93	94	97	98	RC\H 250x5000	15.00
81	94	95	98	99	RC\H 250x5000	15.00
82	100	101	102	103	RC\H 250x5000	15.00
83	101	104	103	105	RC\H 250x5000	15.00
84	104	106	105	107	RC\H 250x5000	15.00
85	102	103	108	109	RC\H 250x5000	15.00
86	103	105	109	110	RC\H 250x5000	15.00
87	105	107	110	111	RC\H 250x5000	15.00
88	108	109	112	113	RC\H 250x5000	15.00
89	109	110	113	114	RC\H 250x5000	15.00
90	110	111	114	115	RC\H 250x5000	15.00
91	106	116	107	117	RC\H 250x5000	15.00
92	116	118	117	119	RC\H 250x5000	15.00
93	118	84	119	85	RC\H 250x5000	15.00
94	107	117	111	120	RC\H 250x5000	15.00
95	117	119	120	121	RC\H 250x5000	15.00
96	119	86	121	92	RC\H 250x5000	15.00
97	111	120	115	122	RC\H 250x5000	15.00
98	120	121	122	123	RC\H 250x5000	15.00
99	121	92	123	96	RC\H 250x5000	15.00
100	124	125	126	127	RC\H 250x5000	15.00
101	125	128	127	129	RC\H 250x5000	15.00
102	128	100	129	102	RC\H 250x5000	15.00
103	126	127	130	131	RC\H 250x5000	15.00
104	127	129	131	132	RC\H 250x5000	15.00
105	129	102	132	108	RC\H 250x5000	15.00
106	130	131	133	134	RC\H 250x5000	15.00
107	131	132	134	135	RC\H 250x5000	15.00
108	132	108	135	112	RC\H 250x5000	15.00
109	136	137	84	85	RC\H 250x5000	15.00
110	137	138	85	88	RC\H 250x5000	15.00
111	138	139	88	90	RC\H 250x5000	15.00
112	140	141	106	116	RC\H 250x5000	15.00



Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

Anexos

113	141	142	116	118	RC\H 250x5000	15.00
114	142	136	118	84	RC\H 250x5000	15.00
115	143	144	100	101	RC\H 250x5000	15.00
116	144	145	101	104	RC\H 250x5000	15.00
117	145	140	104	106	RC\H 250x5000	15.00
118	146	147	124	125	RC\H 250x5000	15.00
119	147	148	125	128	RC\H 250x5000	15.00
120	148	143	128	100	RC\H 250x5000	15.00
121	96	97	149	150	RC\H 250x5000	15.00
122	97	98	150	151	RC\H 250x5000	15.00
123	98	99	151	152	RC\H 250x5000	15.00
124	115	122	153	154	RC\H 250x5000	15.00
125	122	123	154	155	RC\H 250x5000	15.00
126	123	96	155	149	RC\H 250x5000	15.00
127	112	113	156	157	RC\H 250x5000	15.00
128	113	114	157	158	RC\H 250x5000	15.00
129	114	115	158	153	RC\H 250x5000	15.00
130	133	134	159	160	RC\H 250x5000	15.00
131	134	135	160	161	RC\H 250x5000	15.00
132	135	112	161	156	RC\H 250x5000	15.00



Analysis Results

Forces envelope

Note.- Ic is the controlling load condition.
 Forces envelope for :
 $c1=1.4dl+1.7cv$

MEMBER 1

Station		Axial [Ton]	Ic	Shear V2 [Ton]	Ic	Shear V3 [Ton]	Ic	Torsion [Ton*M]	Ic	M22 [Ton*M]	Ic	M33 [Ton*M]	Ic
0%	Max	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
50%	Max	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.08	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

MEMBER 2

Station		Axial [Ton]	Ic	Shear V2 [Ton]	Ic	Shear V3 [Ton]	Ic	Torsion [Ton*M]	Ic	M22 [Ton*M]	Ic	M33 [Ton*M]	Ic
0%	Max	0.00	c1	0.01	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

Anexos

50%	Min	0.00	c1	0.01	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Max	0.00	c1	0.01	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Min	0.00	c1	0.01	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Max	0.00	c1	0.01	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

MEMBER 3

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.21	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1

MEMBER 4

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
50%	Max	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.11	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

MEMBER 5

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
50%	Max	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.09	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

MEMBER 6

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.35	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1

MEMBER 7

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.03	c1
	Min	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.03	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.03	c1
	Min	0.00	c1	-0.90	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.03	c1

MEMBER 8

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
---------	--	----------------	----	-------------------	----	-------------------	----	--------------------	----	----------------	----	----------------	----

Anexos

0%	Max	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.40	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1

MEMBER 9

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
50%	Max	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1

MEMBER 10

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	0.17	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1

MEMBER 11

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.50	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1

MEMBER 12

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	-0.01	c1
50%	Max	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1
	Min	0.00	c1	-0.20	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.01	c1

MEMBER 13

Station		Axial [Ton]	lc	Shear V2 [Ton]	lc	Shear V3 [Ton]	lc	Torsion [Ton*M]	lc	M22 [Ton*M]	lc	M33 [Ton*M]	lc
0%	Max	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
50%	Max	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
100%	Max	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1
	Min	0.00	c1	0.05	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1	0.00	c1



Glosario

Carga dinámica: Carga cuya actuación genera aceleraciones significativas a la estructura o elementos estructurales.

Carga estática: Carga cuya actuación no genera aceleraciones significativas a la estructura o elementos estructurales, en particular a las capas de un firme.

Eje tándem: Conjunto de dos ejes de un vehículo que constituye un solo apoyo del chasis.

Explanada: Es la superficie de apoyo de un firme.

Firme: Estructura resistente formada por una o varias capas superpuestas sobre una explanada para soportar el paso de vehículos. En el caso más completo está constituido por el pavimento, la base y la sub-base.

Fondo: Están bajo los rellenos portuarios y son en general los materiales existentes, no siendo posible en la mayoría de los casos su sustitución aún tratándose de fangos de baja capacidad de soporte.

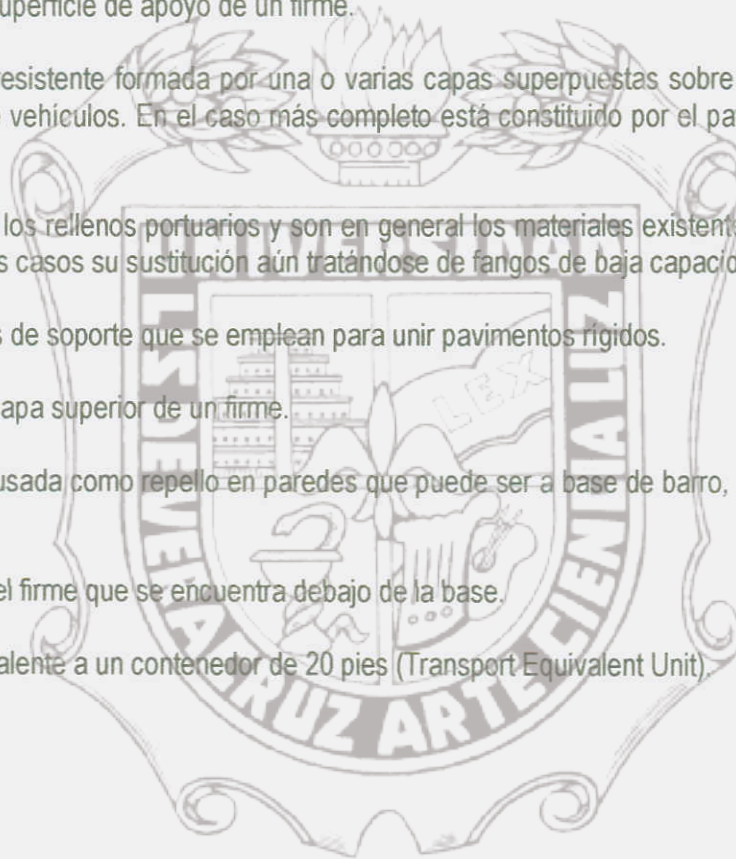
Pasajuntas: Barras de soporte que se emplean para unir pavimentos rígidos.

Pavimento: Es la capa superior de un firme.

Revoque: Mezcla usada como repello en paredes que puede ser a base de barro, cal y arena, cemento u otros materiales.

Sub-base: Capa del firme que se encuentra debajo de la base.

TEU: Unidad equivalente a un contenedor de 20 pies (Transport Equivalent Unit).





Bibliografía y Referencias

14.1 Bibliografía

- 1 Recomendaciones para Obras Marítimas, ROM 4.1-94, 1994, "Proyecto y Construcción de Pavimentos Portuarios", MOPTMA, Madrid, España.
- 2 Cámara Mexicana de la Industria del Transporte Marítimo, "Veracruz, la puerta de México al mundo", p.p 1. Recuperado [07 de Mayo, 2004] de la Red Mundial de Información: <http://www.google.com.mx/search?q=cache:vcyc40JdKxYJ:www.cameintra.org.mx/veracruz.htm+puerto+de+Veracruz,+fluidos&hl=es>.
- 3 Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan, New Edition, 1991, The Japan Ports and Harbour Association.
- 4 López, H., 1999, Operación, Administración y Planeación Portuaria, AMIP, 1ra Edición.
- 5 Huang Yang H, 1993, Pavement Analysis and Design, University of Kentucky, Prentice Hall, inc. U.S.A.
- 6 Método AASHTO, Recuperado [09 de Octubre, 2005] de la Red Mundial de Información: http://72.14.209.104/search?q=cache:Lx-XzPkk9rMJ:www.cemexmexico.com/co/co_pa.do.html+metodo+PCA&hl=es&gl=mx&ct=clnk&cd=2
- 7 Método del PCA, Recuperado [09 de Octubre, 2005] de la Red Mundial de Información: <http://72.14.203.104/search?q=cache:1NDRR1A7eMYJ:icc.ucv.cl/obrasviales/metodopca.htm+metodo+PCA&hl=es>
- 8 Sicartsa, Refuerzo para el concreto, 2005, Recuperado [08 de Octubre, 2005] de la Red Mundial de Información: www.villacero.com/pdf_esp/derivados_de_alambres/mallaelectro/Mallaele.pdf
- 9 Zarco, N., "Un concreto con fibra", p.p 4-6, Recuperado [15 de Julio, 2003] de la Red Mundial de Información: <http://mail.imcyc.com.mx/cyt/junio02/fibra.htm>
- 10 Sika Perú, Aditivos para el concreto, 2005, Recuperado [08 de Octubre, 2005] de la Red Mundial de Información: <http://64.233.187.104/search?q=cache:soJYYC3xJqJ:www.sika.com.pe/Construccion/Main.ASP%3FT%3DT%26P%3D2729+fibras+de+carbono,+concreto&hl=es>
- 11 Los plásticos, 1998, Recuperado [1 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información: <http://64.233.187.104/search?q=cache:Xz9S8EsX9uUJ:www.uc.org.uy/ambiente/plastico.htm+plasticos,+clasificacion&hl=es>
- 12 Hill Brothers, 2003, "Durafiber", p.p 1-3. Recuperado [1 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información: <http://hillbrothers.com/duraspan.htm>
- 13 Industrias Químicas Satecma S.A. "Fibras Satecma", p.p 1. Recuperado [12 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información: <http://www.construmat.com/documentos/novedades/FibrasSatecma.pdf>
- 14 Shotcret, "Fibras de refuerzo secundario para hormigones", p.p 1-2, Recuperado [1 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información <http://www.motorman.cl/shotcret/4.html>
- 15 Fitesa, "Fitesa e Filamentos", p.p 1-2. Recuperado [04 de Noviembre, 2003] de la Red Mundial de Información: <http://www.fitesa.com.br/FF/default.htm>
- 16 Colobraró, R., 2002, "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno", p.p 1. Recuperado [1 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información <http://www.ingenieriaest.iese.edu.ar/investigacion/11-HormigonReforzado.htm>
- 17 Gutiérrez, M., 1995, Materiales y Procedimientos de Construcción, Tomo I, 2da Edición, Ed. Diana.
- 18 Gonzalez, O., 2005, Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado, 3ª Edición, Ed. Limusa
- 19 Torres A, 2003, "Estructuras de concreto en ambiente marino: Periodo de la propagación de la corrosión (T2)", Construcción y Tecnología, Vol. 16, No.185, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Octubre, pp. 22-33.
- 20 Torné P., 2004, Metodología de la Investigación, Recuperado [28 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información: <http://www.enferpro.com/investigcursored.htm#DISEÑO>
- 21 Investigación en sí, 2004, Recuperado [29 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información: <http://www.monografias.com/trabajos14/la-investigacion/la-investigacion.shtml#tipos>
- 22 Metodologías de Investigación en tendencia educativa, 2004. Recuperado [29 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información: <http://dewey.uab.es/pmarques/edusoft.htm>
- 23 Investigación Cualitativa Vs Investigación Cuantitativa, 2004, Recuperado [18 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información:

http://66.102.7.104/search?q=cache:DuY70wD_EU8J:atzimba.crefal.edu.mx/bibdigital/acervo/retablos/RP03/tiv4.htm+tipos+d e+investigaci%C3%B3n,+cuantitativa&hl=es.

24 Instructivo para concreto, 1967, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de proyectos Departamento de Ingeniería Experimental, 1ra Edición.

25 Tipos de Investigación, 2004, Recuperado [30 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información: <http://www.profesiones.cl/papers/lee.php?id=9>

26 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S.C, Norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE, "Cementos Hidráulicos –Especificaciones y métodos de prueba", México, D.F, 2003.

27 Sikafiber, 2004, "Fibras de refuerzo de polipropileno", p.p 2. Recuperado [18 de Octubre, 2004] de la Red Mundial de Información: http://www.sika.com.mx/mx_const-ht-sika_fiber.pdf

28 SCT y el Instituto Mexicano del Transporte, 2002, "Mecánica de materiales para pavimentos", Publicación Técnica No.197, Querétaro, México.

29 Diseño de pavimentos de concreto y/o capas cementadas bajo metodología racional, 2006, Recuperado [05 de Enero, 2006] de la Red Mundial de Información: http://fing.javeriana.edu.co/ingenieria/dep_ing_civil/profesores/freyes/investigacion/Dise%F1o%20Rigidos.pdf.

14.2 Referencias

1. Bentes R., E. Vasconcelos, 1993, "O reforco das fibras", Tchen, revista de Tecnología da Construção, Vol. I, p.p 28-30.
2. Diseño y control de mezclas de concreto, 13ª Edición, 1992, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
3. Golding, J., 2003, "Aplicaciones del Galvanizado por inmersión en Caliente en Instalaciones Petroleras", p.p 1-8. Recuperado [1 de Diciembre, 2003] de la Red Mundial de Información <http://www.avgal.net/Ponencias-4.htm>.
4. Hope, J., 2003, "Mitos y realidades sobre el concreto reforzado con fibras metálicas", Construcción y Tecnología, Vol. 16, No.183, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Agosto.
5. Normas ASTM para ensayos y control de calidad del Concreto y sus Componentes, Asociación Americana para Ensayo de Materiales (ASTM).
6. PCA Portland Cement Association, 1984, "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements", Skokie, Illinois.
7. Práctica recomendada para seleccionar el proporcionamiento de Concreto Normal, Pesado, Masivo, ACI.211.1-81, Reporte de Comité ACI 211 del Instituto americano del Concreto.
8. Rico, R, A., 1994, "La ingeniería de suelos en las vías terrestres", Ed. Limusa, Volumen I 3ra Edición, México D.F.
9. Rico, R, A., 1992, "La ingeniería de suelos en las vías terrestres", Ed. Limusa, Volumen II 2ra Edición, México D.F.
10. Salazar, R, A., 1998, "Guía para diseño y construcción de pavimentos rígidos", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México D.F.
11. Smith, D. R, 1990, "Port and Industrial Design with concrete Pavers", Concrete Paver Institute, Virginia, USA.
12. Torres A, 2005, "El fenómeno de la corrosión y su efecto en la infraestructura de México", Ingeniería Civil, Año. IV, No.431, Colegio de Ingeniero Civiles de México A.C., Marzo, pp. 30-37.
13. Torres A, 2001, "Durabilidad de estructuras de concreto expuestas a un ambiente marino, parte 1: Periodo de la iniciación de la corrosión (T1)", Construcción y Tecnología, Vol. 13, No.157, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Junio, pp. 24-35