



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO POR EL
MÉTODO DE LA PCA**

Para obtener el grado de:

INGENIERO CIVIL

TESIS presentada por:

EFRAÍN CAUDILLO FLORES

Director de Tesis:

ING. ALEJANDRO PERALTA ARNAUD

Morelia, Mich

Noviembre 2014

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.- INTRODUCCIÓN	2
1.1.- Antecedentes	2
1.2.- Tecnología	3
1.3.- Evolución	4
1.4.- VENTAJAS	5
1.4.1.- Durabilidad	5
1.4.2.- Bajo Costo de Mantenimiento	6
1.4.3.- Seguridad	6
1.4.4.- Altos Índices de Servicio	6
1.4.5.- Mejor Distribución de Esfuerzos Bajo las Losas	6
1.5.- Trabajo Continuo	7
CAPÍTULO II: PROCESO DE ELABORACION DEL CEMENTO PORTLAND	8
2.1.- ¿QUÈ SIGNIFICA CEMENTO?	9
2.2.- FABRICACIÓN DEL CEMENTO	9
2.2.1.- Materias Primas	10
2.2.2.- Trituración	12
2.2.3.- Prehomogeneización	13
2.2.4.- Molienda del polvo crudo	13
2.2.5.- Homogeneización del polvo crudo.	14
2.2.6.- Calcinación	15
2.2.7.- Almacenamiento del clíncker	16
2.2.8.- Transformación de clíncker en cemento.	16
2.2.9.- Envase y Embarque.	17
CAPÍTULO III: AGREGADOS PÉTREOS.	18
3.1.- INTRODUCCIÓN	19
3.2.- CLASIFICACIONES	19
3.2.1.- Clasificación por Origen	19
3.2.2.- Clasificación por Composición	20
3.2.3.- Clasificación por Color	21
3.2.4.- Clasificación por Tamaño de Partícula	21
3.2.5.- Clasificación por Modo de Fragmentación	21
3.2.6. Clasificación por Peso Específico	22
3.3.- TERMINOLOGÍA ASTM	23
3.3.1.- Agregado	23
3.3.2.- Agregado Grueso	23
3.3.3.- Agregado Fino	23
3.3.4.- Agregado Pesado	23

3.3.5.- Agregado Ligero	23
3.3.6.- Grava Triturada	24
3.3.7.- Piedra Triturada	24
3.3.8.- Grava	24
3.3.9.- Arena Manufacturada	24
3.3.10.- Arena	24
3.4.- CLASIFICACIONES Y CONCEPTOS A INCLUIR EN LA DEFINICIÓN.	25
3.5.- CLASIFICACIÓN POR TAMAÑOS	25
3.5.1.- Introducción	25
3.5.2.- Características Físicas y Químicas	26
3.5.3.- Limpieza	27
3.5.3.1.- % Máximo Aplicable	28
3.5.3.2.- Materia Orgánica	28
3.5.3.3.- Partículas inconvenientes	28
3.5.3.4.- Densidad	28
3.5.3.5.- Sanidad	28
3.5.3.6.- Absorción y Porosidad	29
3.5.3.7.- Forma de Partícula	29
3.5.3.8.- Textura Superficial	29
3.5.3.9.- Reactividad con los Álcalis	29
3.6.- INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN CONCRETO	30
3.6.1.- En Estado Fresco	30
3.6.2.- En Estado Endurecido	31
3.7.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.	32
3.7.1.- Exploración de Agregados Naturales.	32
3.7.2.- Exploración de Agregados Triturados.	32

CAPÍTULO IV: ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

4.1.- RESEÑA HISTÓRICA DEL MÉTODO DE LA PCA.	35
4.2.- DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LA PCA	36

CAPÍTULO V: DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO- MÉTODO DE LA PCA

5.- FACTORES DE DISEÑO DEL MÉTODO DE LA PCA	38
5.1.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO	38
5.2.- TERRENO DE APOYO O BASE	40
5.3.- PERÍODO DE DISEÑO	41
5.4.- NUMERO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA CADA EJE.	43
5.4.1.- Repeticiones Esperadas	43
5.4.2.- Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)	44
5.4.3.- Factor de Crecimiento Anual (FCA)	44
5.4.4.- Factor de Sentido	46
5.4.5.- Factor de Carril	46
5.5.- FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA	47

CAPÍTULO VI: PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	48
6.1.- ANÁLISIS POR FATIGA	50
6.2.- ANÁLISIS POR EROSIÓN	50
6.3.- EJEMPLO DE DISEÑO POR EL METODO DE LA PCA	62
6.3.1.- Análisis del Tráfico para Conocer el Número de Repeticiones Esperadas para Cada Eje.	63
6.3.2.- Cálculo del Módulo de sub-reacción (k) de diseño	66
6.3.3.- Esfuerzo Equivalente	66
6.3.4.- Relación de Esfuerzos	67
6.3.5.- Análisis por Fatiga	67
6.3.6.- Análisis por Erosión	69
6.3.7.- RESULTADOS.	71

CAPÍTULO VII: DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	74
7.1.- ANÁLISIS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO	75
7.2. UBICACIÓN DE LAS CARGAS	76
7.3. VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO	78
7.4. DESARROLLO DE LA RESISTENCIA ATRAVÉS DEL TIEMPO	78
7.5. ALABEO DEL CONCRETO POR GRADIENTES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	78
7.6. Esfuerzo Equivalente:	79
7.6.1. Análisis de Fatiga.	80
7.6.2. Análisis de Erosión	81

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

Conclusiones	83
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía	88
--------------	----

RESUMEN.

DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO DE LA PCA

POR:

EFRAIN CAUDILLO FLORES

INGENIERO CIVIL

Dirigido por: ING. ALEJANDRO PERALTA ARNAUD

El método de diseño de la Portland Cement Association es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto.

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.

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga.

El método de diseño PCA, consideró un valor fijo de módulo de elasticidad del Concreto (E_c) = 4'000,000 psi que no lo hizo variar en relación con la resistencia a la flexión del concreto (MR), así como tampoco varió el coeficiente de poisson de 0.15.

Este método considera algunas limitaciones en los valores de módulo de reacción K del suelo, en donde el rango de valores para los que el método fue desarrollado oscila entre los 50 y 700 pci.

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 Ejes Sencillos Equivalentes.

Las variables que intervienen en el diseño son:

- Espesor Inicial del Pavimento.
- Módulo de Reacción K del suelo.
- Tráfico.
- Transferencia de Carga y Soporte Lateral.
- Propiedades del Concreto.
- Módulo de Ruptura (Considera una reducción del 15% por seguridad).
- Módulo de Elasticidad Fijo = 4,000,000 psi.
- Módulo de Poisson Fijo = 0.15.

Cemento, Agregados, Concreto Hidraulico, Factores, Variables

ABSTRACT

DESIGN OF A RIGID PAVEMENT BY THE METHOD OF THE PCA

BY:

EFRAIN CAUDILLO FLORES

The method of design of the Portland Cement Association is exclusively a method of design developed for concrete pavements.

The method of design of the PCA considers two evaluation criteria in the design procedure, the criterion of erosion of the sub-base below the slabs and the fatigue of the concrete pavement.

The criterion of erosion recognizes that the pavement can fail by excessive pumping, soil erosion of support and differences of elevations on the seals. The approach of the effort of fatigue recognizes that the pavement can fail, presenting cracking derived from excessive load repetitions.

The PCA method of design, i consider it a fixed value of modulus of elasticity of the concrete (EC) = 4 '000.000 psi that did not vary in relation to the flexural strength of the concrete (MR), as well as also remained the Poisson coefficient of 0.15 .

This method considers some limitations in the modulus values of K soil reaction, where the range of values for which the method was developed ranges between 50 and 700 pci.

An advantage that should be recognized in the PCA method is that it takes the actual traffic that estimated will circulate on the pavement, without converting it single axles equivalent.

The variables involved in the design are:

- Initial Thickness of the pavement.
- Module K reaction of the soil.
- Traffic.
- Load Transfer, and lateral support.
- Properties of concrete.
- Modulus of rupture (considered a reduction of 15% for safety).
- Fixed Elasticity Module = 4,000,000 Spanish-speaking psi.
- Fixed Poisson Module = 0.15.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.

ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO.

Las crecientes necesidades de desarrollo, la búsqueda de soluciones perdurables y la demanda de contar con más y mejores caminos han contribuido para lograr que en la modernización y ampliación de la red carretera de México se esté especificando el uso de pavimentos del concreto hidráulico bajo estándares internacionales de calidad.

1.1 Antecedentes.

En la conformación de nuestra infraestructura carretera ha influido la gran diversidad de climas, tipos de suelo, zonas ambientales y etnias, debido a la extensión territorial de México; su heterogeneidad nos ha marcado el camino del desarrollo y crecimiento.

En México las condiciones de servicio de los aproximadamente 95,000 Km. de caminos pavimentados no son las óptimas, de hecho la mayoría de ellos está catalogado por las propias autoridades como pavimentos en regulares y malas condiciones. Una razón importante del bajo nivel de servicio es debido a que estas carreteras se proyectaron, diseñaron y construyeron, en su mayoría, entre los años de 1925 a 1970. La red estuvo proyectada para soportar cargas vehiculares que varían entre las 6 y 8 toneladas, pero en la actualidad llega a tener camiones cargados que en algunos casos alcanzan a pesar hasta 60 toneladas; esto sin considerar el peso de los vehículos. No se contó tampoco con el crecimiento del tránsito de camiones pesados, sólo se considero el tráfico diario que tenía entonces, entre los 500 y 1,000 vehículos; sin embargo, en la actualidad se tienen valores significativamente mayores, de hasta 15,000 vehículos.

Hasta 1993 la especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México fue relativamente escasa. Quizá esto se debió, principalmente, a que nuestro país es un importante productor de petróleo y por consiguiente de asfalto. Anteriormente existía un subsidio importante en el precio del asfalto, los pavimentos asfálticos en nuestro país resultaban en costo muy inferiores a los del concreto hidráulico.

Los pavimentos de asfalto parecían ser una alternativa suficiente; además de la desinformación y desconocimiento de las nuevas tecnologías con pavimentos de concreto hidráulico. Ante el deterioro de las carreteras en la red y considerando los puntos anteriormente planteados, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se dio a la tarea de buscar soluciones alternativas que pudieran soportar adecuadamente las cargas y el volumen de tráfico pesado, buscando que los niveles de servicio permanecieran altos durante períodos mayores. La SCT orientó a una solución con pavimentos de concreto hidráulico, que ante tales exigencias representaban un costo razonable, con una capacidad estructural adecuada,

tanto para el volumen de tránsito como para la intensidad del mismo, y un período de vida costeable de acuerdo a la magnitud de la inversión.

1.2 Tecnología.

Para satisfacer la demanda de diseñar y construir los pavimentos de concreto hidráulico, con las mejores tecnologías a nivel mundial y con altos estándares en sus especificaciones, tuvo que llevarse a cabo un programa de capacitación intensivo y avanzado para los técnicos e ingenieros especificadores, esto se logró con el apoyo de la iniciativa privada mexicana, interesada en el desarrollo de la infraestructura del país con base en este tipo de pavimentos. Estas capacitaciones se han seguido desarrollando tanto en México como en el extranjero.

Se realizó una revisión exhaustiva sobre los tipos de maquinaria disponibles en el mercado internacional para realizar estas tareas: plantas de mezclado central para la elaboración del concreto con la calidad y en las cantidades necesarias para lograr altos rendimientos en la pavimentación, pavimentadoras de cimbra deslizante con las características necesarias para lograr altos niveles de servicio, seguridad y confort.

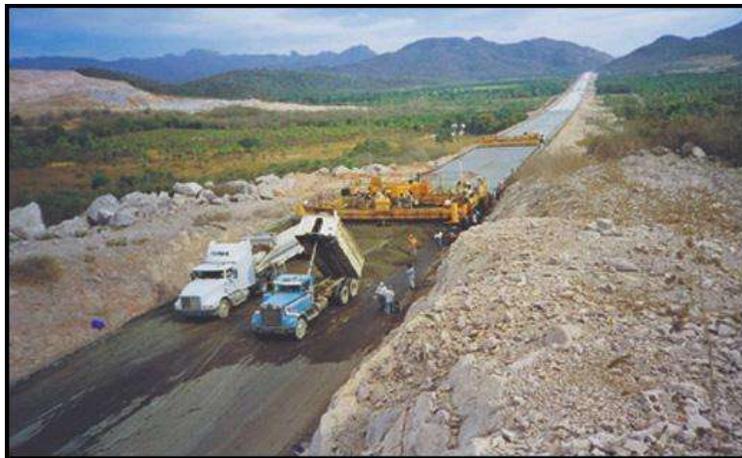


FIGURA 1. Pavimentadora de cimbra deslizante.

Se analizaron también ventajas y desventajas de unas marcas de equipos con respecto a otras, la experiencia de las empresas dedicadas a la fabricación de estos equipos, la facilidad con la que dichas empresas podrían ofrecer los servicios de capacitación, refacciones y mantenimiento e incluso la posibilidad de desarrollar representantes locales, de dichas empresas, para dar servicio en México. Se trabajó en lo referente a equipos para dar el texturizado final al pavimento de concreto, las maquinas cortadoras para conformar los tableros de losas, los diferentes tipos de discos para estos cortes y algunos otros equipos de medición de las características físicas de los pavimentos.

Terminados los análisis anteriores se importaron los equipos seleccionados a nuestro país y se dio inicio al desarrollo de este tipo de soluciones.

1.3 Evolución.

La globalización hizo más imperantes las necesidades de contar con una infraestructura que permita el desarrollo de la actividad económica y social del país.

En el año de 1993 la SCT, con el apoyo de Cementos Mexicanos, construyó la primera carretera de concreto hidráulico con el uso de las nuevas tecnologías de pavimentación cumpliendo con especificaciones internacionales, siguiendo estrictas normas de calidad tanto en la producción como en el tendido del concreto y contemplando una serie de alternativas en las especificaciones que permitirían establecer, posteriormente, situaciones comparativas para establecer adecuadamente las características ideales en las especificaciones de los pavimentos de concreto hidráulico. Así en 1993 el libramiento Ticumán ya era una realidad con una longitud de 8.5km.

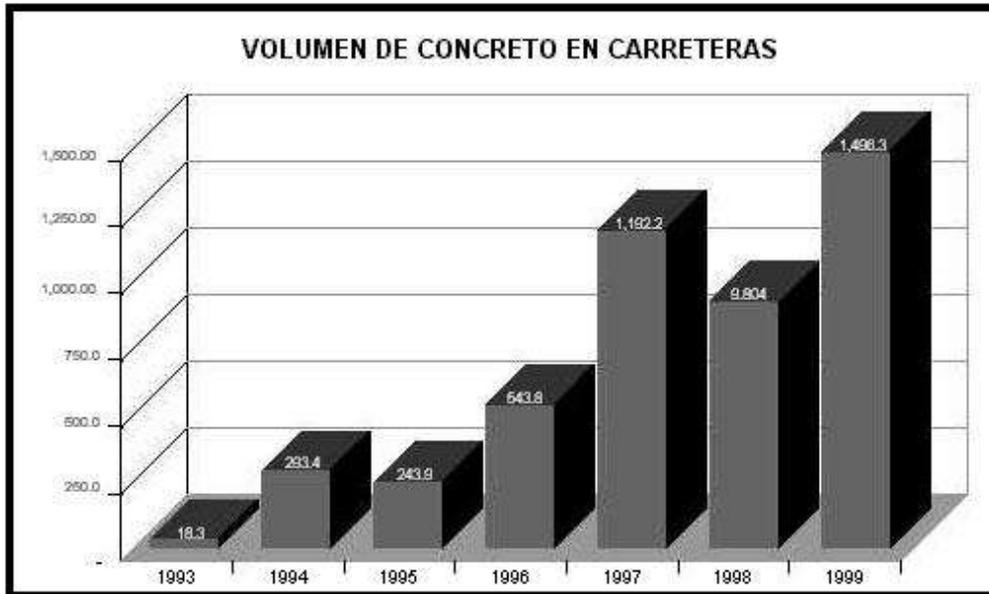


FIGURA 2. Autopista de concreto hidráulico.

A partir de este proyecto y con los resultados programados que se fueron obteniendo del mismo, se continuó con la especificación y construcción de otras carreteras de concreto hidráulico en el país, de tal forma que al final de 1994 ya se habían iniciado los trabajos en los tramos de las Autopistas Guadalajara – Tepic, Tuxpan – Tihuatlán y – Poza Rica, también el primer tramo de la Cárdenas – Agua Dulce.

El crecimiento y evolución de los pavimentos de concreto hidráulico ha aumentado de una manera muy favorable para el país; esto ha propiciado que la demanda de caminos de excelente calidad aumente por las ventajas que los mismos representan.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento del consumo de concreto hidráulico para la construcción de carreteras.



Nota: El volumen de 1999 incluye tramos terminados, en ejecución y licitados.

GRAFICA 1.

1.4 VENTAJAS.

Las principales ventajas de un pavimento de concreto hidráulico son las siguientes: Durabilidad, bajo costo de mantenimiento, seguridad, altos índices de servicio y mejor distribución de esfuerzos bajo las losas.

1.4.1 Durabilidad.

Es una de las ventajas más significativas de los pavimentos de concreto hidráulico. Para lograr la durabilidad del concreto, es importante considerar, además de la resistencia adecuada ante las sollicitaciones mecánicas, todos los agentes externos de exposición a los que estará sujeto el pavimento para elaborar la mezcla apropiada y definir las recomendaciones. Para la colocación del concreto hidráulico; se deben de usar las proporciones específicas, con ciertas relaciones agua/cemento, utilizando aditivos que permitan una reducción de agua en la mezcla y que den la trabajabilidad adecuada al concreto, aún con revenimientos bajos, como los utilizados en autopistas.

Es importante, también, conocer las características de los materiales que forman la estructura del soporte y sus grados de compactación, apoyados con los estudios de mecánica de suelos, para lograr óptima durabilidad.

El diseñador debe contar con la suficiente información, para poder estimar de forma precisa el volumen de tráfico y las cargas vehiculares que estarán transitando por el pavimento, para realizar un diseño estructural adecuado y cubrir las expectativas de durabilidad del proyecto por efectos de fatiga.

1.4.2 Bajo Costo de Mantenimiento.

Los pavimentos de concreto hidráulico se han caracterizado por requerir de un mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil. Esto es, sin duda, una de las ventajas mayores que ofrecen. La significativa reducción en los costos de mantenimiento de una vía permiten que el concreto sea una opción muy económica. Esto se puede visualizar al realizar un análisis del costo ciclo de vida que puede ser comparado con algunas otras alternativas de pavimentación. El análisis del costo ciclo de vida es una herramienta que nos ayuda en la toma de decisiones. El mantenimiento que requieren los pavimentos rígidos es mínimo, sin embargo es muy importante que el mismo se provea en tiempo y forma adecuados para garantizar las propiedades del pavimento.

1.4.3 Seguridad.

El concreto hidráulico colocado bajo las especificaciones y con los equipos mencionados, permite lograr una superficie de rodamiento con alto grado de planicidad, y dada su rigidez, esta superficie permanece plana durante toda su vida útil, evitando la formación de roderas que disminuyen el área de contacto entre llanta y pavimento, produciendo el efecto de acuaplaneo en los días de lluvia. Otro fenómeno que se evita con la utilización del concreto hidráulico es la formación de severas deformaciones en las zonas de arranque y de frenado, que hacen a los pavimentos ser mas inseguros y maltratan fuertemente los vehículos.

El color del pavimento de concreto hidráulico, permite una mejor visibilidad en caso de transitar de noche o en días nublados.

1.4.4 Altos Índices de Servicio.

Los pavimentos de concreto hidráulico permiten ser construidos con altos índices de servicio, por su grado de seguridad y, adicionalmente, siguiendo las recomendaciones de construcción adecuadas, se puede proveer al pavimento de una superficie altamente antiderrapante. La utilización de pasajuntas permite mantener estos índices de servicio, evitando la presencia de escalonamientos en las losas, sobretodo en tramos donde el tráfico es más pesado.

1.4.5 Mejor Distribución de Esfuerzos Bajo las Losas.

Por la rigidez de la losa, los esfuerzos que se transmiten a las capas inferiores del pavimento se distribuyen de una manera prácticamente uniforme, cosa contraria a lo que sucede con los pavimentos flexibles, en donde las cargas vehiculares concentran un gran porcentaje de su esfuerzo exactamente debajo del punto de aplicación de la carga y que disminuyen conforme se alejan de la misma. La distribución uniforme de las cargas permite que los esfuerzos máximos que se transmiten al cuerpo de soporte sean mucho menores en magnitud, lo que permite una mejor condición y menor deterioro de los suelos de soporte.

1.5 Trabajo Continuo.

Poco a poco se ha logrado tener una mayor experiencia en el diseño, especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México, estas experiencias han mostrando las ventajas de esta solución; de tal modo que cada vez son mas las entidades gubernamentales responsables de la construcción, mantenimiento y operación de los caminos a los que les interesa proveer con las características de un pavimento de concreto hidráulico lo que les significa ahorros sustanciales en mantenimiento, mejores niveles de servicio del camino, mayor vida útil y consecuentemente, economía de los recursos. Podemos afirmar que la pavimentación con concreto hidráulico es una realidad en nuestro país y el siguiente paso, en el que estamos trabajando a pesar de que son mínimas las necesidades, es el de dar a conocer, a los especificadores y constructores, los métodos de rehabilitación, reparación y mantenimiento que se deben seguir en los pavimentos rígidos para aprovechar mejor sus ventajas.

CAPÍTULO II:

**PROCESO DE
ELABORACION DEL
CEMENTO PORTLAND**

2.1 ¿QUÉ SIGNIFICA CEMENTO?

La palabra cemento es nombre de varias sustancias adhesivas. Deriva del latín *caementum*, porque los romanos llamaban *opus caementitium* (obra cementicia) a la grava y a diversos materiales parecidos al hormigón que usaban en sus morteros, aunque no eran la sustancia que los unía.

Hoy llamamos cemento por igual a varios pegamentos, pero de preferencia, al material para unir que se usa en la construcción de edificios y obras de ingeniería civil.

También se le conoce como cemento hidráulico, denominación que comprende a los aglomerantes que fraguan y endurecen una vez que se mezclan con agua e inclusive, bajo el agua.

De acuerdo con la definición que aparece en la Norma Oficial Mexicana (NOM), el cemento portland es el que proviene de la pulverización del clínker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento, como pudieran ser los álcali.

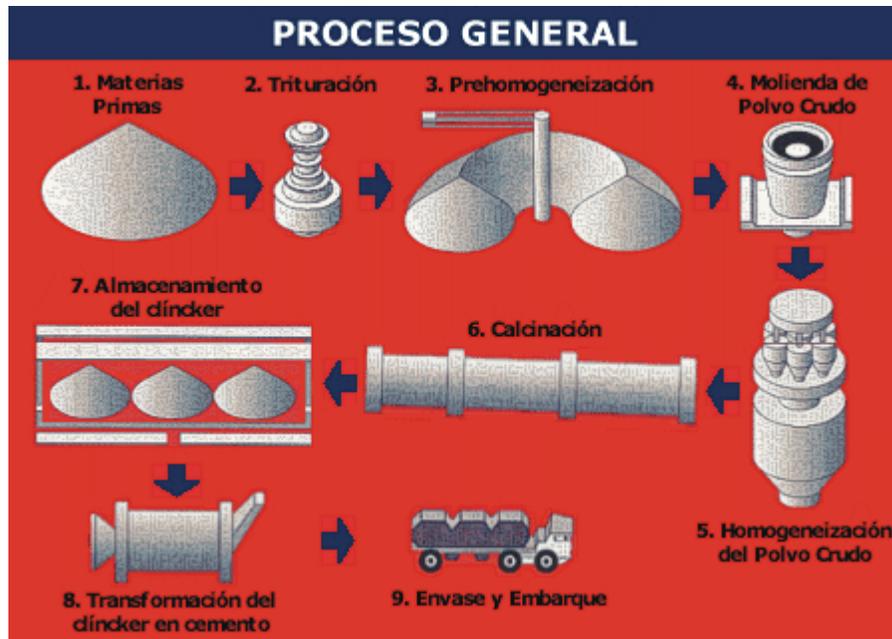
2.2 FABRICACIÓN DEL CEMENTO

El cemento portland se fabrica en cuatro etapas básicas:

1. Trituración y molienda de la materia prima.
2. Mezcla de los materiales en las proporciones correctas, para obtener el polvo crudo.
3. Calcinación del polvo crudo.

Molienda del producto calcinado, conocido como clíncker, junto con una pequeña cantidad de yeso.

A continuación se muestra una figura ilustrando el proceso general de la obtención y fabricación del cemento.



Enseguida se describe de una manera mas amplia cada parte del proceso.

2.2.1. Materias Primas

La caliza y la pizarra se obtienen de canteras cercanas a las fábricas. Las canteras son propiedad de la cooperativa. El caolín es una arcilla con alto contenido de alúmina que se utiliza para la fabricación del cemento blanco.

Caliza

Se encuentra en las capas superficiales de muchos cerros y montañas, en depósitos de profundidad variable, Los hay de más de 200 metros. Para la fabricación de cemento se sacan volúmenes muy grandes porque la caliza representa el 80% de las materias primas que forman el clínker. Por eso conviene que esté cerca de la planta; de no ser así el costo del cemento se elevaría demasiado por razón del acarreo.

Primero se explora el cerro para conocer el volumen y saber el grado de pureza del material que se va a explotar. El análisis químico permite conocer la calidad de una cantera de caliza. Se considera buena la que tiene carbonato de calcio en un 95% o más. Abajo de 90% ocasiona problemas.

Debido a su dureza se extrae de las canteras con el empleo de explosivos. Una voladura puede producir de 30 a 100 mil toneladas de materia prima.

Pizarra

Se les llama "pizarra" a las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65%, por óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxidos de fierro de 6 a 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10%. Es también la principal fuente de álcalis. La pizarra representa aproximadamente un 15% de la materia prima que formará el clínker. Como estos minerales son relativamente suaves, el sistema de extracción es similar al de la caliza, sólo que la barrenación es de menor diámetro y más espaciada, además requiere explosivos con menor potencia.

Debido a que la composición de éstos varía de un punto a otro de la corteza terrestre, es necesario asegurar la disponibilidad de las cantidades suficientes de cada material.

Sílice

Eventualmente se agregan arenas sílicas que contienen de 75% a 80% de sílice, para obtener el óxido de silicio requerido en la mezcla cruda. La Cruz Azul posee jales de sílice en Tlalpujahuá, Mich. Los jales son un desecho de las minas, rico en óxido de silicio.

Hematita

A lo que aporta mineral de fierro se le llama 'hematita', aunque pueden ser diversos minerales de fierro o escoria de laminación. La hematita contiene entre 75 y 90% de óxido férrico. Con estos minerales se controla el contenido de óxido férrico de la mezcla. La hematina constituye entre el 1 y 2% de la mezcla cruda.

Caolín

El caolín es una arcilla con alto contenido de alúmina que se utiliza para la fabricación del cemento blanco. La Cruz Azul lo consigue en Agua Blanca, al norte del Estado de Hidalgo, de donde lo envía por ferrocarril a la planta de Lagunas, Oaxaca.

En la siguiente lámina se observa de manera esquemática este proceso de materias primas:



2.2.2. Trituración

Este proceso se muestra de manera grafica en la siguiente lámina:



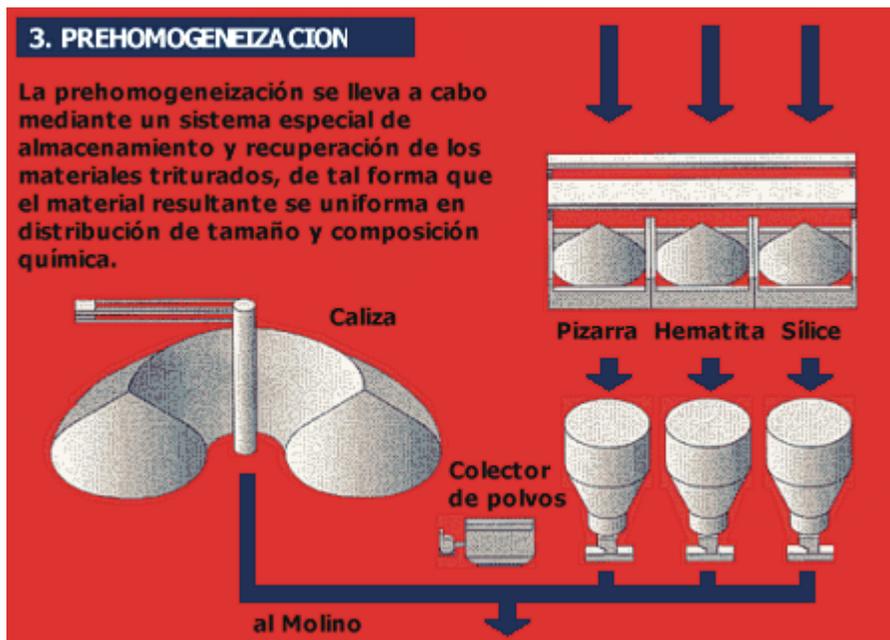
2.2.3. Prehomogeneización

De los patios de prehomogeneización los minerales son transportados por medio de sistemas de bandas, y descargados a tolvas, las cuales alimentan a los poidómetros para dosificar los materiales.

Los poidómetros son mecanismos que tienen una banda giratoria bajo la cual hay una báscula electrónica. Si cae poco material, la velocidad de la banda aumenta y viceversa.

Una vez triturada, prehomogeneizadas y dosificadas, las materias primas alimentan a los molinos de crudo.

De manera ilustrativa se muestra enseguida:

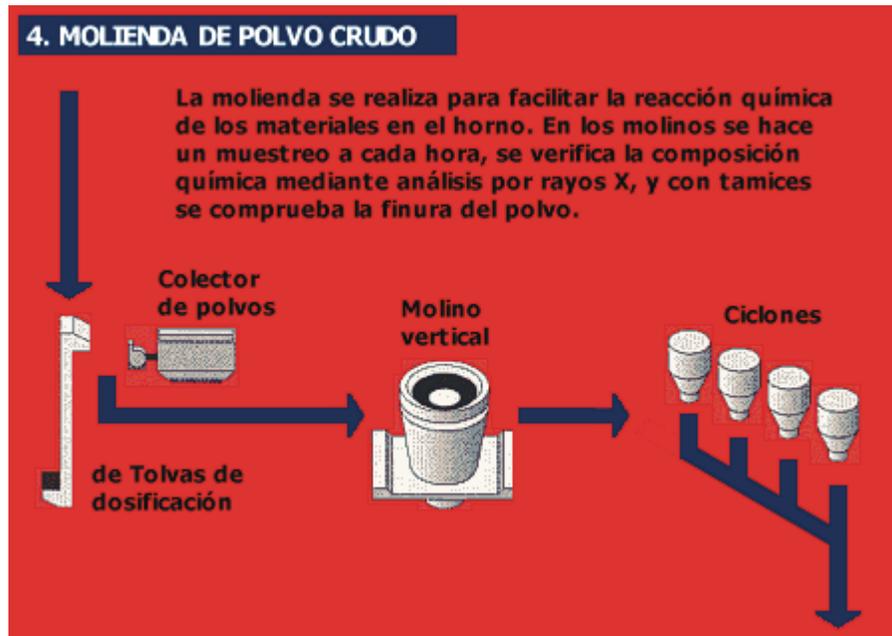


2.2.4. Molienda del polvo crudo

El resultado del análisis indica si es preciso ajustar la dosificación y la finura, ya que la mezcla cruda necesariamente debe conservar cierta relación entre los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio.

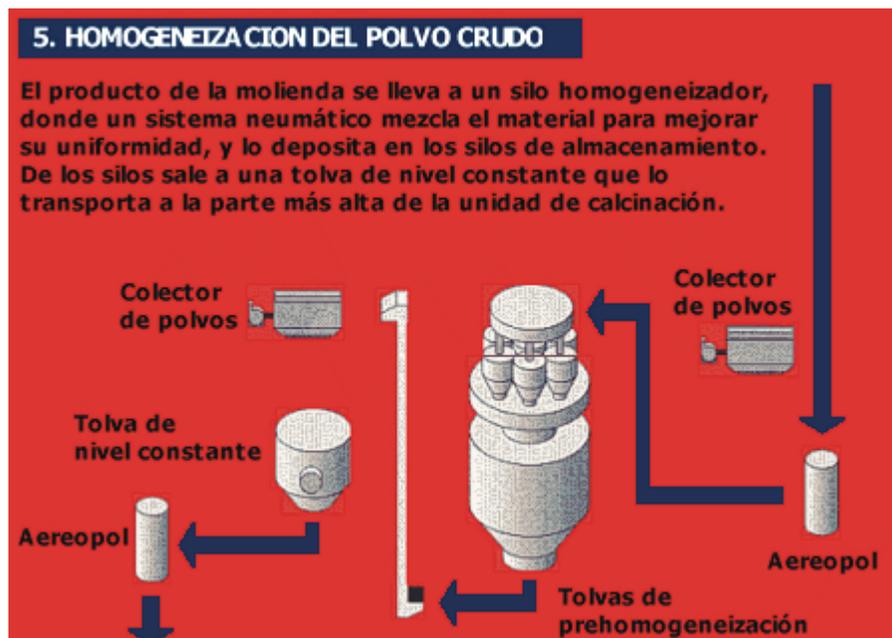
Se lleva un estricto control químico, además, las partículas de caliza no deben ser mayores de 125 micras y las de cuarzo no deben medir más de 45 micras para garantizar una operación normal del horno. si la mezcla de polvo crudo no fuera uniforme, el horno

tendería a enfriarse o a calentarse demasiado, lo que obligaría a ajustar la velocidad o el flujo de combustible.



2.2.5. Homogeneización del polvo crudo.

Esta etapa se muestra en la siguiente lámina:



2.2.6. Calcinación

Los cambios físicos y químicos son graduales. Cuando el polvo crudo entra a la cuarta zona del horno cambia su composición química en una suma de compuestos que se llama clínker.

La palabra clínker procede del inglés y significa 'escoria'. Se define clínker como el producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizas que contengan óxido de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente calculadas.

El producto de la calcinación debe tener una composición química predeterminedada. No debe haber exceso de cal porque aparecería como cal libre en el cemento y hacer un concreto produciría expansiones y grietas. Sería un cemento insano. Es importante, por ende, evitar la cal libre mediante la correcta dosificación de las materias primas y una clinckerización a la temperatura adecuada, (1450° C).



2.2.7. Almacenamiento del clínker

Esta etapa se muestra en la siguiente lámina:



2.2.8. Transformación de clínker en cemento.

Esta etapa se muestra en la siguiente lámina:



2.2.9. Envase y Embarque.

Esta etapa se muestra en la siguiente lámina:



CAPÍTULO III: AGREGADOS PETREOS.

3.1 INTRODUCCIÓN

Tal vez uno de los problemas más triviales pero más difundidos en relación con los agregados para concreto, es la terminología que se utiliza para su identificación. Esto se debe a que en forma indiscriminada se generan diferentes definiciones y clasificaciones para hablar de ellos. También se debe destacar la influencia que genera la procedencia de los diferentes términos utilizados, que tienen alguno de los siguientes orígenes y alcances:

Origen o Procedencia	Alcance o Influencia
Asociaciones tipo ASTM o ACI	Continental o Mundial
Normas, reglamento, leyes, etc.	País
Costumbres, denominación de origen, práctica local, etc.	Ciudad o región

A esta diversidad de definiciones, se deben agregar las diferentes formas de clasificar que son empleadas en el caso de los agregados para concretos.

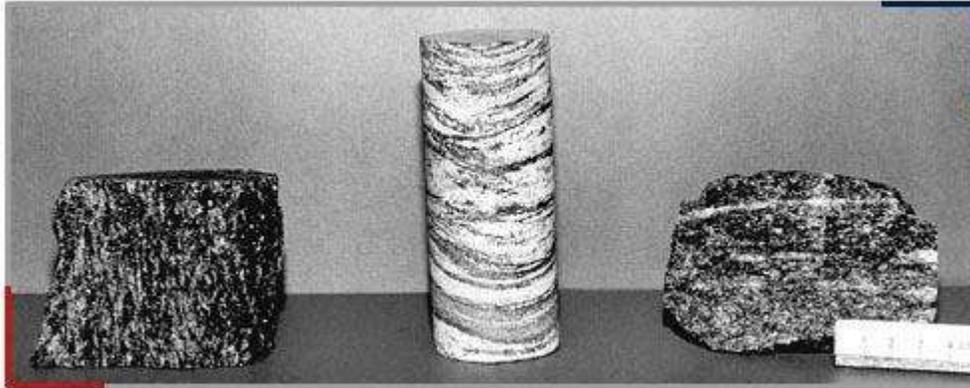
3.2 CLASIFICACIONES

A continuación se mencionan las clasificaciones más comunes que se emplean para este tipo de materiales:

3.2.1. Clasificación por Origen

Esta clasificación toma como base la procedencia natural de las rocas y los procesos físico-químicos involucrados en su formación. Con base en ello, se divide a las rocas en tres grandes grupos:

- ▣ Ígneas
- ▣ Sedimentarias
- ▣ Metamórficas



Ninguna de estas identificaciones considera, en su proceso de clasificación, las propiedades físicas y/o químicas que debe cumplir un agregado para concreto.

3.2.2. Clasificación por Composición

Esta división tiene como fundamento la composición químico-mineralógica de cada roca, además de llevar en forma implícita una denominación de origen. A continuación se mencionan algunos ejemplos de este tipo de clasificación:

- | | | |
|------------|------------|-----------|
| ▪ Caliza | ▪ Tezontle | ▪ Caliche |
| ▪ Andesita | ▪ Tepojal | ▪ Granito |
| ▪ Basalto | ▪ Riolita | ▪ Mármol |

Al ser las características químicas y mineralógicas las únicas que intervienen en este tipo de agrupación, se tiene el fuerte inconveniente de no considerar las características físicas del material, tan importantes en la evaluación de los agregados para concreto.

Para puntualizar lo anterior se pueden mencionar dos ejemplos:

- a) La caliza, el mármol y el caliche tienen la misma composición química, pero no la misma resistencia física; aun más, es muy común que entre las calizas se observen diferentes grados de calidad física.
- b) El basalto y el tezontle tienen la misma composición química, pero al tener el tezontle una gran cantidad de espacio poroso lo hace un agregado ligero y de menor resistencia.

3.2.3. Clasificación por Color

Tal vez sea la clasificación más común que existe y la más fácil de generar o utilizar, ya que sólo considera el color del material.

La utilización de una clasificación simplista es una actividad más frecuente de lo deseable, ya que si bien es una forma rápida de identificar un agregado, es la que proporciona la mínima información del mismo.

3.2.4. Clasificación por Tamaño de Partícula

Esta identificación de los materiales se deriva de la condición mínima del concreto convencional de dividir a los agregados en dos fracciones principales cuya frontera nominal es 4.75 mm (malla No. 4 ASTM), dando por resultado lo siguiente:

Clasificación	Intervalo Nominal (mm)	Mallas Correspondientes	
		NMX	ASTM
Agregado fino	0.075 - 4.75	F0.075-G4.75	No. 200-No 4
Agregado grueso	4.75 - variable (+)	G4.75 - (+)	No. 4 - (+)

(+) El límite superior en el intervalo nominal del agregado grueso, y la designación de la malla correspondiente, dependen del tamaño máximo de la grava que se utilice (Mena, 1994).

3.2.5. Clasificación por Modo de Fragmentación

Por la forma en que ocurre el proceso de fragmentación de los materiales, la cual puede ser:

- ▣ **Natural:** por procesos naturales (erosión).
- ▣ **Manufacturada (triturados):** por procesos artificiales (mecánicos).
- ▣ **Mixta:** combinación de materiales fragmentados por procesos naturales y artificiales.

Este tipo de división no valida ninguna característica físico-química del agregado.



3.2.6. Clasificación por Peso Específico

Esta identificación de agregados se genera de una característica básica del concreto que es su peso unitario, el cual a su vez depende del peso específico de los agregados que se utilizan en su fabricación. La división básica que existe es:

- ▣ Ligero
- ▣ Normal
- ▣ Pesado



Esta clasificación de agregados valora la correspondiente aptitud de los mismos para producir concreto con diferentes pesos unitarios, pero no considera sus características físico-químicas en forma detallada.

De acuerdo a lo anterior, se puede detectar o provocar un problema de comunicación, al existir tan variadas clasificaciones, que toman como base en algunos casos información inútil en la calificación de un agregado para concreto, o bien la información que proporcionan es incompleta. La situación que se genera por esta información parcial es:

- ▣ Identificaciones imprecisas.
- ▣ Establecimiento de juicios erróneos, al desconocer las bases de cada clasificación.
- ▣ Aplicación de criterios equivocados en la evaluación de agregados.
- ▣ Usos indiscriminados de las clasificaciones.

3.3. TERMINOLOGÍA ASTM

Dado que en el medio del concreto existe una terminología muy amplia, y se usa en forma indiscriminada, es conveniente revisar cuál es la propuesta de un organismo internacional que se dedica a especificar en relación con este tipo de producto.

Material granular, el cual puede ser arena, grava, piedra triturada o escoria, usado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico.



Terminología Relativa a los Agregados para Concreto (ASTM C 125 - 92a)

3.3.1. Agregado

Material granular, el cual puede ser arena, grava, piedra triturada o escoria, usado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico.

3.3.2. Agregado grueso

- 1) Agregado predominantemente retenido en la malla No. 4 (4.75 mm)
- 2) Es la porción de un agregado retenido en la malla No. 4 (4.75 mm)

3.3.3. Agregado Fino

- 1) Agregado que pasa la malla de 3/8" (9.5 mm) y casi totalmente pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es predominantemente retenido en la malla No. 200 (0.075 mm)
- 2) Es la porción de un agregado que pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es retenido en la malla la No. 200 (0.075 mm)

3.3.4 Agregado Pesado

Agregado de alta densidad, el cual puede ser barita, magnetita, limonita, ilmenita, hierro o acero.

3.3.5. Agregado Ligero

Agregado de baja densidad usado para producir concreto ligero, incluye: pómez, escoria volcánica, tobas, diatomita, arcilla sintética o expandida, lutita, pizarra, lutitas diatomáceas, perlita, vermiculita y productos de combustión de carbón.

3.3.6. Grava Triturada

Es el producto resultado de la trituración artificial de gravas, en la cual la mayoría de los fragmentos tienen mínimo una cara resultado de la fractura.

3.3.7. Piedra Triturada

Es el producto de la trituración artificial de rocas, peñascos o fragmentos de roca grandes, en el cual todas las caras resultantes se derivan de las operaciones de trituración.

3.3.8 Grava

Agregado grueso resultante de la desintegración natural y abrasión de rocas o transformación de un conglomerado débilmente cementado.

3.3.9 Arena Manufacturada

Agregado fino producido por trituración de grava, roca, escoria o concreto hidráulico.

3.3.10. Arena

Agregado fino resultado de la desintegración y abrasión de roca o la transformación de una arenisca completamente friable.

Es notable que para este organismo las clasificaciones de origen, color, y composición no se emplean en la definición de agregados para concreto, y sí se toman en cuenta las clasificaciones que definen el tamaño, el modo de fragmentación y el peso específico.

- ▣ Para definir correctamente a los agregados, se recomienda eliminar el uso de clasificaciones ambiguas, imprecisas y/o incompletas (origen, color y composición).
- ▣ Los especialistas del concreto deben impulsar la utilización de una terminología precisa y adecuada para la definición de los agregados para concreto.
- ▣ Se propone la aplicación de la siguiente metodología para la identificación de agregados:

Dependiendo de la aplicación que se pretenda dar al agregado, en la identificación se pueden utilizar una o más tipos de clasificaciones, con la finalidad de detallar lo más posible las características a cumplir por el agregado.

3.4. CLASIFICACIONES Y CONCEPTOS A INCLUIR EN LA DEFINICIÓN.

- ▣ Tamaño del agregado, especificando el tamaño máximo del agregado grueso. En casos de requerimientos especiales en la granulometría, proporcionar la curva granulométrica.
- ▣ Modo de fragmentación (opcional).
- ▣ Peso específico, especificando el peso unitario del concreto a fabricar.

3.5. CLASIFICACIÓN POR TAMAÑOS

3.5.1. Introducción

Es reconocido que más del 60% de cada metro cúbico de concreto fabricado está constituido por los agregados, condición que destaca la importancia que tienen estos materiales en la elaboración de este producto. Bajo esta condición, las características de los materiales que los forman y los efectos de su uso en el concreto se han estudiado con mucho mayor detalle, de tal forma que se pueda producir un concreto de mejores características en estado fresco y con una mayor durabilidad.

Los agregados pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características (modo de fragmentación, tamaño de partícula, origen, composición, forma de partícula y color). Su utilización y aplicación puede consultarse en el capítulo "Terminología Empleada en los Agregados para Concreto" que se incluye en esta Guía.

Agregado Fino (arena)

1) Agregado que pasa la malla 3/8" (9.5 mm) y casi totalmente pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es predominantemente retenido en la malla No. 200 (0.075 mm).

2) Es la porción de un agregado que pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es retenido en la malla No. 200 (0.075 mm).

Agregado Grueso (grava)

1) Agregado predominantemente retenido en la malla No. 4 (4.75 mm).

2) Es la porción de un agregado retenido en la malla No. 4 (4.75 mm).

La eliminación de las otras clasificaciones (origen, composición, forma de partícula y color) se debe a que presentan los siguientes inconvenientes:

- ▣ Clasificaciones creadas con un objetivo diferente a la identificación de agregados para concreto (ejemplo: la división de rocas en ígneas, sedimentarias y metamórficas se realizó de acuerdo con las condiciones naturales de formación de las rocas y no calificando sus características físicas particulares asociables al uso en concreto).

- Conceptos ambiguos (ejemplo: desde el punto de vista de la composición química, basalto y tezontle son lo mismo, aunque es reconocido que pueden tener una diferencia significativa en color y peso volumétrico).
- No califican ninguna característica física de las que se evalúan en los agregados para concreto (ejemplo: origen).
- Miembros de familias diferentes o iguales pueden tener características físicas distintas o similares, generando confusión en las propiedades del material (ejemplo: hay calizas de muy diversa calidad física, desde buena hasta pésima).
- Clasificaciones simplistas que inducen a interpretaciones erróneas (ejemplo: el color).

3.5.2. Características Físicas y Químicas

Las características de los agregados que es conveniente evaluar antes de ser empleados en la fabricación de concreto son las que se indican en la siguiente tabla.

Debido a la importancia que reviste especificar y clasificar los agregados de concreto para una obra, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Características y requisitos a cumplir de la estructura que se va a fabricar.
- b) Agregados disponibles en el sitio.
- c) Composición granulométrica de los agregados a emplear.

Característica	Pruebas aplicables	
	NMX	ASTM
Granulometría	C-111	C 33
Limpieza	C-111	C 33
▪Finos indeseables		D 2419
▪Materia orgánica	C-88	C 40
▪Partículas inconvenientes	C-84 / C-71 / C-75 / C-172	C117 / C142 / C88 / 123
Densidad	C-164 / C-165	C 127 / C 128
Sanidad	C-75	C 88
Absorción y Porosidad	C-164 / C-165	C 127 / C 128
Forma de Partícula	C-265 / C-165	C 295 / C 128
Textura Superficial	C-265	C 295
Reactividad con los álcalis		
▪Examen petrográfico	C-265	C 295

▣Método químico	C-271 / C-272	C 289 / C 586
▣Barras de mortero	C-180	C 227 / C 1105

**CLASIFICACIÓN POR PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD
GRANULOMETRÍA**

Agregado Fino (arena)

Constituido nominalmente por partículas cuyo tamaño está entre 0.075 y 4.75 mm, en donde es deseable que exista continuidad granulométrica, es decir que exista presencia de todos los tamaños representantes de las diferentes fracciones que están establecidas.

Es importante comentar que si bien es útil que el agregado fino cumpla con la continuidad granulométrica, resulta poco prudente el especificar la arena con base a esta característica, ya que un adecuado diseño de mezclas o bien el uso de aditivos en el concreto, permite disminuir los posibles efectos no deseados por una deficiencia de esta característica del agregado.

Agregado Grueso

Es el que queda en el intervalo nominal comprendido desde 4.75 mm hasta la dimensión máxima que contenga el concreto, magnitud que define el tamaño máximo en cada caso. Al igual que en el agregado fino, es deseable que exista una continuidad granulométrica de la fracción. Por lo anterior, es claro que el límite superior del agregado grueso es el que rige la curva granulométrica a especificar para cada tipo de concreto, de acuerdo con sus necesidades constructivas.

De igual forma que en el agregado fino, los efectos por una deficiente composición granulométrica pueden ser disminuidos, vía la aplicación adecuada de la tecnología de concreto.

3.5.3. Limpieza

Finos indeseables (limo y arcilla)

En forma general, para la especificación de esta característica hay dos criterios para la utilización de agregados en concretos:

Finos que pasan la malla No. 200	Norma aplicada NMX C-111*	
*	Arena (%)	Grava (%)

Finos de cualquier tipo	5.0	2.0
Finos sin arcilla**	10.0	3.0

3.5.3.1. % máximo aplicable.

Para conocer el carácter arcilloso de los finos que pasan la malla No. 200, es aplicable la prueba de equivalente de arena.

3.5.3.2. Materia orgánica

La especificación de esta característica de los agregados limita el contenido de este producto con base en una clasificación colorimétrica, en donde un tono más oscuro que el color de referencia es condición que se considera como una presencia excesiva, y por tanto es causa de rechazo.

3.5.3.3. Partículas inconvenientes

Esta especificación se realiza con base en el tipo de partícula presente en el agregado, de acuerdo a lo siguiente:

Carbón y lignito en la arena	0.50 a 1.0%
Calcedonia de peso específico menor a 2.40	3.0 a 8.0%
Terrones de arcilla	ver material que pasa la malla No 200

3.5.3.4. Densidad

No hay una especificación sobre los límites de aceptación para esta característica, principalmente porque no tiene correlación con el grado de sanidad de los materiales que se analizan. Además, depende del peso unitario del concreto que se va a producir, dividiéndose para ello en ligero, normal y pesado.

3.5.3.5. Sanidad

La sanidad se define como la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras. Esta propiedad tiene mucha importancia porque es un buen índice del desempeño predecible del agregado al ser usado en concreto

	NMX C-111
Agregado fino	10% máximo
Agregado grueso	12% máximo

3.5.3.6. Absorción y Porosidad

No hay una especificación sobre el límite de aceptación de esta característica, dado que esta depende de muy diversos factores, tales como: contenido de finos, forma y textura superficial de las partículas, porosidad de la roca y distribución granulométrica. Se reconoce como información válida, sin embargo, que cuando se tienen rocas de buena calidad física y los agregados cumplen las otras especificaciones que se le solicitan, el agregado grueso no rebasa el 3% de la absorción, así como el agregado fino no supera el 5% máximo.

3.5.3.7. Forma de Partícula

En términos generales, no existe una especificación estricta para esta característica que evalúe la redondez y esfericidad de los agregados, ya que es demostrable que en condiciones idénticas, son más adecuados los agregados de formas redondeadas para la producción de concretos con resistencias que no excedan los valores de 250 kg/cm². Asimismo, es recomendable que para concretos que requieran desarrollar mayores resistencias a las de referencia, se haga uso de partículas de formas más angulosas. En el caso de la esfericidad evaluada por la presencia de partículas planas y alargadas, es recomendable que éstas no superen el 20% máximo de acuerdo con el comité ACI 207.

3.5.3.8. Textura Superficial

Al igual que para la forma, no existe una especificación rigurosa para la textura superficial, ya que los diferentes tipos que existen producen efectos diversos en la fabricación de concreto.

3.5.3.9 Reactividad con los Álcalis

Existen tres pruebas que evalúan esta característica de los agregados, independientemente de si la reacción es álcali-sílice o álcali-carbonato. Las tres son importantes por los elementos de juicio que aportan sobre el posible comportamiento del material al ser utilizado en la fabricación de concreto:

Método de prueba	Carácter del resultado	Evaluación
Estudio petrográfico*	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Método químico	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Barras de mortero	Definitivo, estimación potencial	**

Es importante ya que califica cuál es el tipo de reacción que puede presentar el agregado, al identificar y cuantificar los materiales potencialmente reaccionantes. Valor de la expansión en relación con el tipo de reacción y su clasificación.

	Álcali-Sílice (NMX C-180)	Álcali- Carbonato (ASTM C 1105)
Inocuo	< 0.05% a tres meses	< 0.015% a tres meses
Moderadamente reactivo	> 0.05%, < 0.10%	> 0.015%, < 0.025%
Deletéreo	> 0.10 a seis meses	> 0.025% a seis meses

3.6 INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN CONCRETO

3.6.1. En Estado Fresco

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Peso unitario	Densidad Tamaño máximo / granulometría
Manejabilidad	Granulometría Forma de partícula
Contracción plástica	Limpieza Partículas friables
Requerimiento de agua	Tamaño máximo / granulometría Sanidad Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Pérdida de revenimiento	Absorción
Segregación	Tamaño máximo / granulometría

3.6.2. En Estado Endurecido

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Durabilidad	Textura superficial Sanidad Absorción Porosidad Reactividad con los álcalis
Resistencia a compresión	Limpieza Tamaño máximo / granulometría Forma de partícula Resistencia mecánica Partículas friables Textura superficial
Cambios volumétricos	Tamaño máximo / granulometría Forma de partícula Limpieza Presencia de arcilla Módulo de elasticidad
Costo	Tamaño máximo / granulometría Forma de partícula Textura superficial Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Resistencia a la abrasión	Resistencia a la abrasión
Peso unitario	Densidad
Permeabilidad	Porosidad
Partículas friables / terrones de arcilla	Irregularidades superficiales

3.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

3.7.1 Exploración de agregados naturales.

Se ha mencionado que los agregados naturales (arenas y gravas) proceden de la fragmentación de rocas por fuerza de la naturaleza; sin embargo, no todos son útiles para elaborar concreto; por ello, es conveniente conocer el origen de dichos materiales para entender mejor sus diferencias.

Los principales procesos que conducen a la desintegración de rocas en la corteza terrestre son el desgaste de las irregularidades en el relieve, el diastrofismo y el vulcanismo; de los anteriores el primero es el que contribuye en mayor grado a la formación de agregados naturales ocasionada por diversos agentes naturales físicos y químicos. El diastrofismo es el proceso por el cual grandes masas de corteza terrestre se desplazan unas respecto a otras al experimentar reajustes. La acepción general del proceso de vulcanismo corresponde a los efectos que se manifiestan sobre las rocas en estado de fusión antes de ser proyectadas al exterior, y a los efectos que producen en contacto con la superficie terrestre. Existen numerosos ejemplos de rocas fragmentadas, de origen volcánico, que constituyen yacimientos de agregados naturales, los cuales reciben el nombre de depósitos piroclásticos.

La meteorización es el conjunto de fenómenos físicos y químicos que producen el desintegramiento de las rocas por degradación superficial de sus propiedades. Este proceso, también conocido como alteración, avanza en forma paulatina desde la superficie hacia el interior, de modo que el material que se desprende de la roca madre frecuentemente es de material alterado, razón por la cual se desconfía de este tipo de material en relación con su utilidad como agregado para concreto. No obstante, hay ocasiones en que la desintegración de la roca se debe a fuerzas destructivas que no degradan sus propiedades (cambios de temperatura, ciclos de congelación y deshielo), en cuyo caso los fragmentos resultantes son sanos y no objetables.

3.7.2. Exploración de agregados triturados.

Al analizar formaciones rocosas que sirvan para producir agregados triturados, deben atenderse los siguientes aspectos:

a) *Calidad y homogeneidad de la roca.* Para conocer la calidad de la roca existente en una formación rocosa, se requiere de la inspección detallada y la determinación de sus propiedades sobre muestras representativas del banco. La inspección debe enfocarse hacia conocer la uniformidad y homogeneidad del material en todos los frentes, determinando la presencia de material superficial alterado y su espesor probable, conociendo la existencia de fracturas o juntas rellenas de arcilla o de otro material indeseable, y estimar el volumen aproximado aprovechable.

Para determinarlas es necesario obtener muestras representativas de la roca en diferentes zonas y profundidades de la formación.

b) *Potencialidad de la formación rocosa.* Cuando la formación rocosa se manifiesta como un afloramiento bien definido, la estimación de su potencialidad puede efectuarse mediante un simple levantamiento topográfico. De no ser así, es necesario proceder a la ejecución de barrenos de sondeo y al empleo de métodos geofísicos de medición. En este último caso, la estimación requiere los servicios de personal profesional, a fin de establecer con precisión número y dirección de barrenos necesarios, y efectuar con claridad la interpretación de los datos aportados por las mediciones.

c) *Características resultantes del producto.* Tiene gran importancia predecir con suficiente aproximación las características de forma y granulometría de los fragmentos que se vayan a producir en el momento de triturar la roca procedente de un cierto banco de material, ya que sirven como un elemento de juicio adicional para la selección de materia prima más conveniente. En este sentido, conviene recordar que las formas deseables son las equidimensionales, y que la roca triturada se encuentre exenta de polvo durante la trituración y su aplicación.

Normalmente, es posible suponer dichas características a través de exámenes macro y microscópicos de la roca, observando su estructura y textura. Las rocas que no presentan planos débiles definidos, como el cuarzo, ofrecen la misma probabilidad de fracturarse en cualquier dirección y producen fragmentos con tendencia equidimensional; en cambio, minerales como los feldespatos, que presentan dos planos de cruce, producen fragmentos con tendencia tabular. Por otra parte, rocas que en su estructura tienen granos poco entrelazados tienden a disgregarse demasiado durante la trituración, produciendo exceso de finos; en cambio, las rocas compactas con granos fuertemente entrelazados tienden a producir pocos finos durante la trituración. Es posible que mediante una selección adecuada del equipo de trituración, se pueda influir en las características granulométricas y de forma de las rocas.

CAPÍTULO IV:

ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

4.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL MÉTODO DE LA PCA.

Hablando en mayor detalle de los pavimentos rígidos, hay diversos métodos de diseño de estos: PCA, AASTHO, etc. El procedimiento de diseño de la PCA está basado en información obtenida de diferentes fuentes, incluyendo investigaciones, desarrollos teóricos, ensayos de pavimentos a escala real, y el monitoreo de la performance de pavimentos en servicio. Un programa de investigación llevado a cabo por la Portland Cement Association correlacionó la información de diseño de estas fuentes obteniendo como resultado un procedimiento desarrollado únicamente para pavimentos suelo-cemento.

En 1933 la Portland Cement Association (PCA) publicó el procedimiento para el diseño de espesores de concreto correlacionado con el tráfico, e introdujo los primeros conceptos de fatiga así como las primeras ecuaciones empíricas. La versión actual del método de la PCA fue publicada en 1984 en la misma se han introducido numerosos casos, con respecto a la anterior, aparecida en 1966. Para ello se han aprovechado los avances en los métodos de análisis de pavimento, los cuales han permitido estudiar la influencia de una serie de factores que no pudieron ser considerados de forma adecuada en la versión precedente, tales como pavimentos con pasadores en las juntas, bases de concreto pobre, bermas de concreto, deterioro del pavimento debido a la erosión de la base, vehículos pesados con ejes tridem, etc.

Un aspecto que se destaca en la versión de 1984 es la introducción del criterio de erosión, el cual reconoce que un pavimento (especialmente si está sometido a un tránsito pesado) puede fallar por fenómenos de bombeo o "pumping", erosión de la base y escalonamiento de las juntas, antes que por fatiga debida a excesivas repeticiones de carga..

En general, el método de diseño de la PCA está basado en:

1. Análisis comprensivo de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas del pavimento, esquinas, y bordes, por un programa de computadora de elemento finito.
2. Modelos y pruebas a escala verdadera como la Arlington Test y varios proyectos de investigación dirigidos por la PCA y otras agencias acerca de sub-bases, juntas y hombros de concreto.
3. Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado, tales como la Bates Test Road, the Pittsburg Test Highway, the Maryland Road Test, the AASHO Road Test, y estudios de pavimentos de autopistas en servicio realizado por varios departamentos de estado de transporte.
4. El desempeño de pavimentos construidos normalmente sujetos a tráfico normal.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LA PCA

La formulación del método de diseño de Portland Cement Association (PCA) es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto.

El método de diseño de Portland Cement Association (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.

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte, y diferencias de elevaciones de las juntas. El criterio del esfuerzo por fatiga reconoce que el pavimento puede fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga.

A diferencia del método AASHTO el método de diseño de la PCA, considera un valor fijo del módulo de elasticidad del concreto (E_c)= 4'000 000 psi que no lo hizo variar en relación con la resistencia a la flexión del concreto (MR), así como tampoco varió el coeficiente de poisson de 0.15.

Este método considera algunas limitaciones en los valores del módulo de reacción K del suelo, en donde el rango de valores para que el método fue desarrollado oscila entre los 50 y 700 pci.

Una ventaja que se debe reconocer en el método de la (PCA) es que toma el tráfico real que estima circulara sobre el pavimento, sin convertirlo Ejes Sencillos Equivalentes.

**CAPÍTULO V:
DISEÑO DE PAVIMENTO
RÍGIDO- MÉTODO DE LA
PCA**

5.- FACTORES DE DISEÑO DEL MÉTODO DE LA PCA

El diseño de espesores se realiza basándose principalmente en cinco factores:

1. Resistencia a la flexión del concreto, (Módulo de ruptura, MR).
2. Terreno de Apoyo ó Base.
3. Periodo de diseño.
4. Numero de repeticiones esperadas para cada eje.
5. Factor de seguridad para las cargas, (FS).

Los siguientes aspectos están basados principalmente en el manual de diseño de la PCA,

5.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas.

El alabeo del pavimento de concreto bajo las cargas del tráfico provoca esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Sin embargo la proporción de los esfuerzos a compresión contra la resistencia a la compresión del concreto es mínima como para influir en el diseño de espesor de la losa. En cambio la relación de los esfuerzos a flexión contra la resistencia a la flexión del concreto es mucho más alta y frecuentemente excede valores de 0.5. Por este motivo los esfuerzos y la resistencia a la flexión son los empleados para el diseño de espesores. La resistencia a la flexión del concreto es determinada por la prueba del módulo de ruptura, realizada en vigas de 6x6x30 pulgadas.

El módulo de ruptura puede encontrarse aplicando la carga en cantiliver, punto medio o en 3 puntos. Una diferencia importante en estos métodos de prueba es que al aplicar la carga en 3 puntos se obtiene la mínima resistencia del tercio medio de la viga de prueba, mientras que los otros 2 métodos muestran la resistencia en un solo punto.

El valor determinado por el método de aplicación de carga de 3 puntos (American Society for Testing and Materiales, ASTM C78) es el empleado en este método de diseño.

La prueba del módulo de ruptura es comúnmente realizada a los 7, 14, 28 y 90 días. Los resultados a los 7 y 14 días son comparados contra especificaciones de control de calidad y para determinar cuándo puede ser abierto al tránsito un pavimento. Los resultados a los 28 días se han usado generalmente para el diseño de espesores de autopistas y calles; mientras que los resultados a los 90 días son usados para el diseño de aeropistas, esto es debido a que se presentan muy pocas repeticiones de esfuerzos

durante los primeros 28 ó 90 días del pavimento comparado contra los millones de repeticiones de esfuerzos que ocurrirán posteriormente.

Sabemos que el concreto continúa ganando resistencia con el paso del tiempo, como lo muestra la figura 2.5-1. Esta ganancia de resistencia es mostrada en la curva que representa valores de módulo de ruptura (MR) promedios para varias series de pruebas de laboratorio, pruebas de vigas curadas en campo y secciones de concreto tomadas de pavimentos en servicio.

En este procedimiento de diseño los efectos de las variaciones en la resistencia del concreto de punto a punto del pavimento y el incremento de resistencia con el paso del tiempo están incorporados en las gráficas y tablas de diseño. El diseñador no aplica directamente estos efectos, sino que simplemente ingresa el valor de la resistencia promedio a los 28 días, que en nuestro país se recomienda como mínimo 41 kg/cm² (583 psi) y como máximo 50 kg/cm² (711 psi).

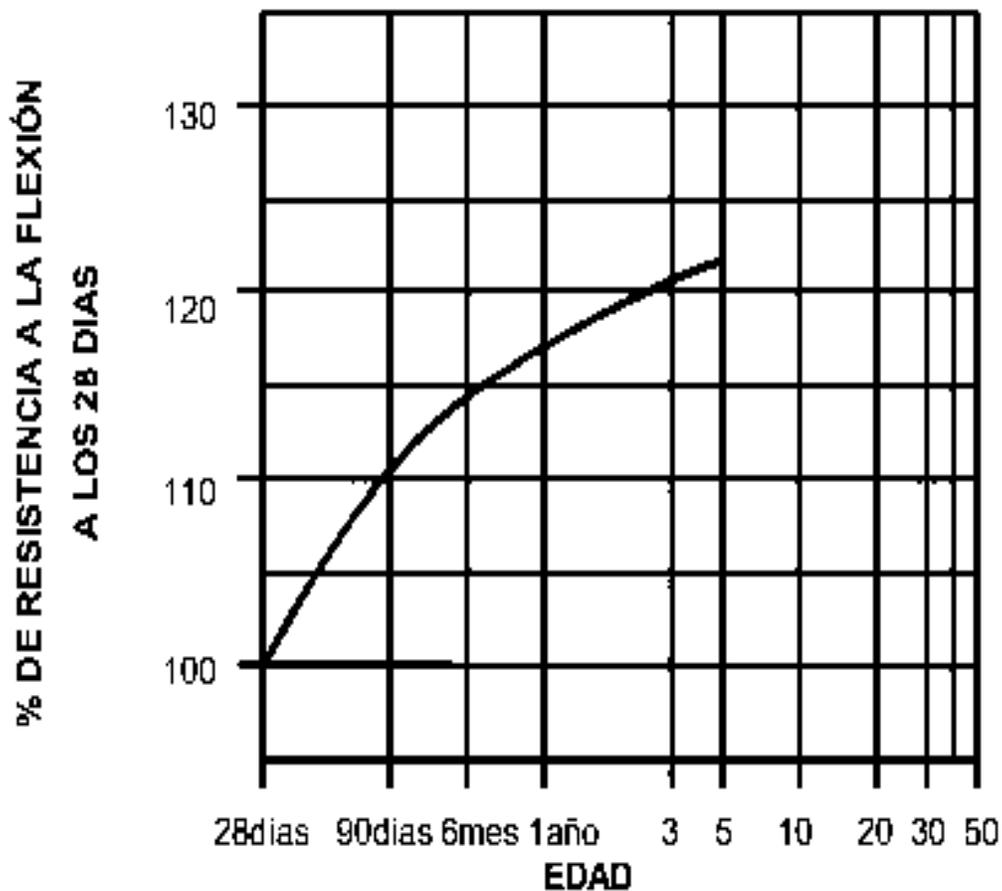


Figura 2.5-1 Curva de desarrollo de resistencia a la flexión a través del tiempo

5.2. TERRENO DE APOYO Ò BASE

Soporte dado a los pavimentos de concreto por la base y la sub-base, es el segundo factor en el diseño de espesores. El terreno de apoyo está definido en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (k). Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada de un área cargada (un plato de 30" de diámetro) dividido entre la deformación en pulgadas que provoca dicha carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi / in) o más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

La figura 2.5.2 nos muestra una ilustración de la prueba de placa regulada por la norma ASTM D1195 y D1196.



Figura 2.5.2 Prueba de Placa (ASTM D1195 y D1196).

Dado que la prueba de placa lleva tiempo y dinero, los valores de k son usualmente estimados mediante una correlación a pruebas más simples como la del VRS (valor Relativo de Soporte). El resultado es válido por que no se requiere una exacta determinación del valor k; ya que variaciones normales del valor k no afecta significativamente los requerimientos del espesor del pavimento. La relación mostrada en la figura 2.5-3 es correcta para estos propósitos.

La prueba de caminos AASHTO comprobó convincentemente que la reducción de pérdida de terreno de soporte durante los períodos de descongelamiento tiene ningún o muy poco efecto en el espesor requerido de los pavimentos de concreto. Esto es cierto porque los pocos períodos en que los valores de k son bajos durante el descongelamiento de la primavera se compensan con los largos períodos en que se congelan y los valores de k son mucho mayores que los asumidos para el diseño

Para evitar métodos tediosos que requieren de diseño para las variaciones de k en las épocas del año, los valores recomendables como valores promedio son los de verano u otoño.

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

o mejorada el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en los valores presentados en la tabla 2.5-1

Los valores mostrados en la tabla 2.5-1 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 - Subbase en losas de prueba completas.

Las bases mejoradas o 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. Se construyen con materiales granulares.

Como los tipos de suelos AASHTO A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3, el contenido de cemento es determinado mediante las pruebas de Congelación - Descongelación y Mojado – Secado y el criterio de pérdidas admisibles de la PCA.

Los valores de diseño de módulo de sub-reacción (k) para bases cementadas que cumplen con éste criterio se muestran en la tabla 2.5-2.

5.3. PERÍODO DE DISEÑO

El término de período de diseño es algunas veces considerado sinónimo del término período de análisis de tráfico. Dado que el tráfico muy probablemente no puede ser supuesto con precisión por un período muy largo, el período de diseño de 20 años es el comúnmente empleado en el procedimiento de diseño de pavimentos.

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

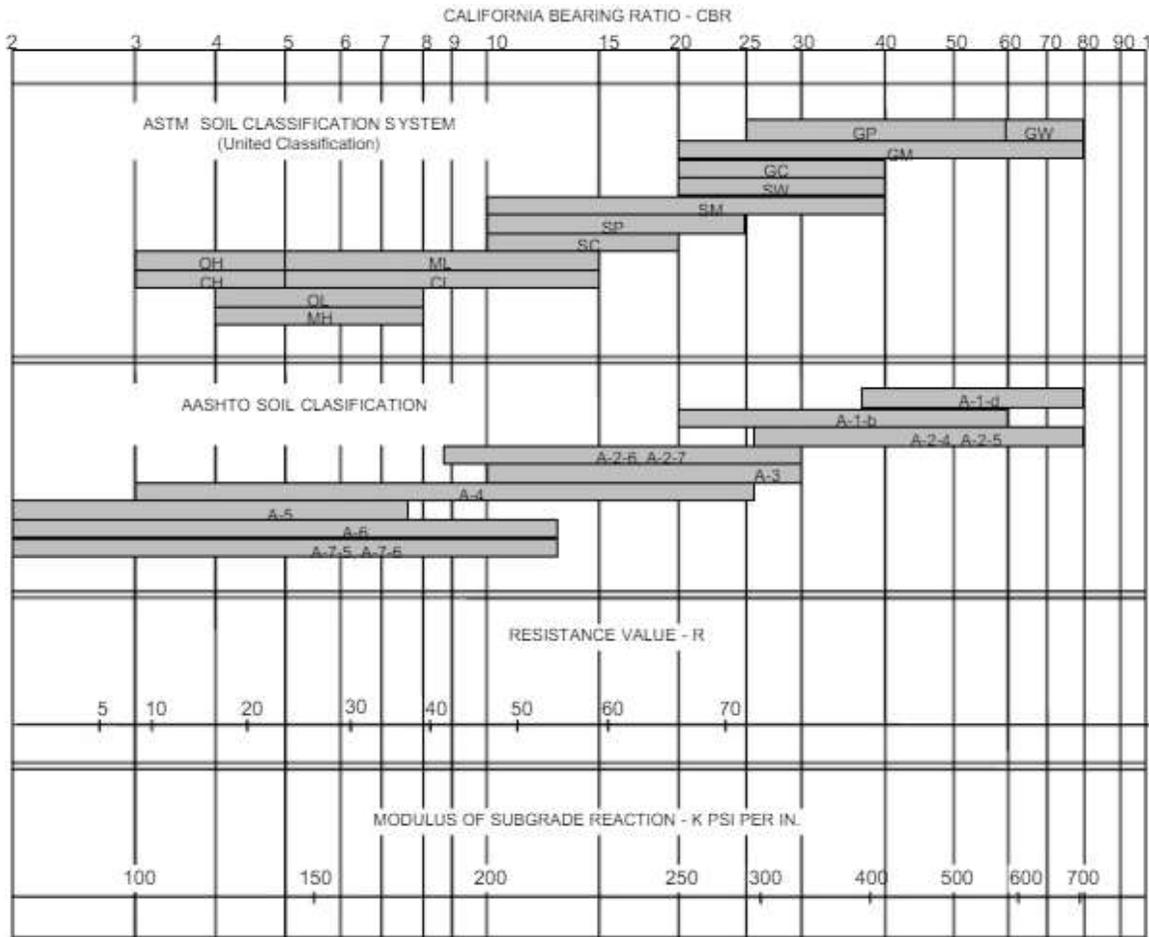


Figura 2.5-3 Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo y sus valores de resistencia.

k Suelo - Sub-base (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Tabla 2.5-1 Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular

k Suelo - Subbase (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor Subbase			
	4"	6"	8"	10"
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	--

Tabla 2.5-2 Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular cementada.

5.4. NUMERO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA CADA EJE.

Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas durante todo el período de diseño de cada tipo de eje. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer 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 período de diseño.

5.4.1. Repeticiones Esperadas.

$$Re = TPDA \times \%Te \times FS \times FC \times Pd \times FCA \times 365$$

Dónde:

TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual.

% Te = % del TPDA para cada tipo de eje.

FS = Factor de Sentido.

FC = Factor de Carril.

Pd = Período de Diseño.

FCA = Factor de Crecimiento Anual.

365 = días de un año.

5.4.2. Tránsito promedio diario anual (TPDA)

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados o de algún organismo relacionado con el transporte, ya sea municipal, estatal o federal. 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 considere únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas. Sin embargo no es tan importante el hacer caso a esta recomendación debido a que el tráfico ligero no influye demasiado en el diseño de espesores.

5.4.3. 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 de manera rápida con la ayuda de la tabla 2.5-3 que presenta relaciones entre tasas de crecimiento anual y factores de crecimiento anual para períodos de diseño de 20 y 40 años.

Si se desea obtener el factor de crecimiento anual del tráfico (FCA) de manera más exacta, se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

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

Dónde:

FC = Factor de Crecimiento Anual.

n = Vida útil en años.

g = Tasa de crecimiento anual, en %

Tabla 2.5-3 Factores de Crecimiento Anual, según la tasa de crecimiento anual.

TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL DE TRÁFICO Y SUS CORRESPONDIENTES FACTORES DE CRECIMIENTO		
TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRÁFICO, %	FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL PARA 20 AÑOS	FACTOR DE CRECIMIENTO ANUAL PARA 40 AÑOS
1.0	1.1	1.2
1.5	1.2	1.3
2.0	1.2	1.5
2.5	1.3	1.6
3.0	1.3	1.8
3.5	1.4	2.0
4.0	1.5	2.2
4.5	1.6	2.4
5.0	1.6	2.7
5.5	1.7	2.9
6.0	1.8	3.2

En un problema de diseño el factor de proyección se multiplica por el TPDA presente para obtener el TPDA de diseño representando el valor promedio para el período de diseño.

Los siguientes factores influyen en las tasas de crecimiento anual y proyecciones de tráfico:

1. El tráfico atraído o desviado. El incremento del tráfico existente debido a la rehabilitación de algún camino existente.
2. Crecimiento normal de tráfico. El crecimiento normal provocado por el incremento del número de vehículos.
3. Tráfico generado. El incremento provocado por los vehículos que no circularían por la vía si la nueva facilidad no se hubiese construido.
4. Tráfico por desarrollo. El incremento provocado por cambios en el uso del suelo debido a la construcción de la nueva facilidad.

Los efectos combinados provocan tasas de crecimiento anual de 2 al 6%. Estas tasas corresponden como se muestra en la tabla 2.5.3 a factores de crecimiento del tráfico de 1.2 a 1.8, diseñando a 20 años.

5.4.4. 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.

5.4.5. Factor de Carril

Después de verse afectado el tráfico por el factor de sentido, también debemos de analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril. El factor de carril nos 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 2.5.4 en donde este factor depende del número de carriles por sentido o dirección del tráfico y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

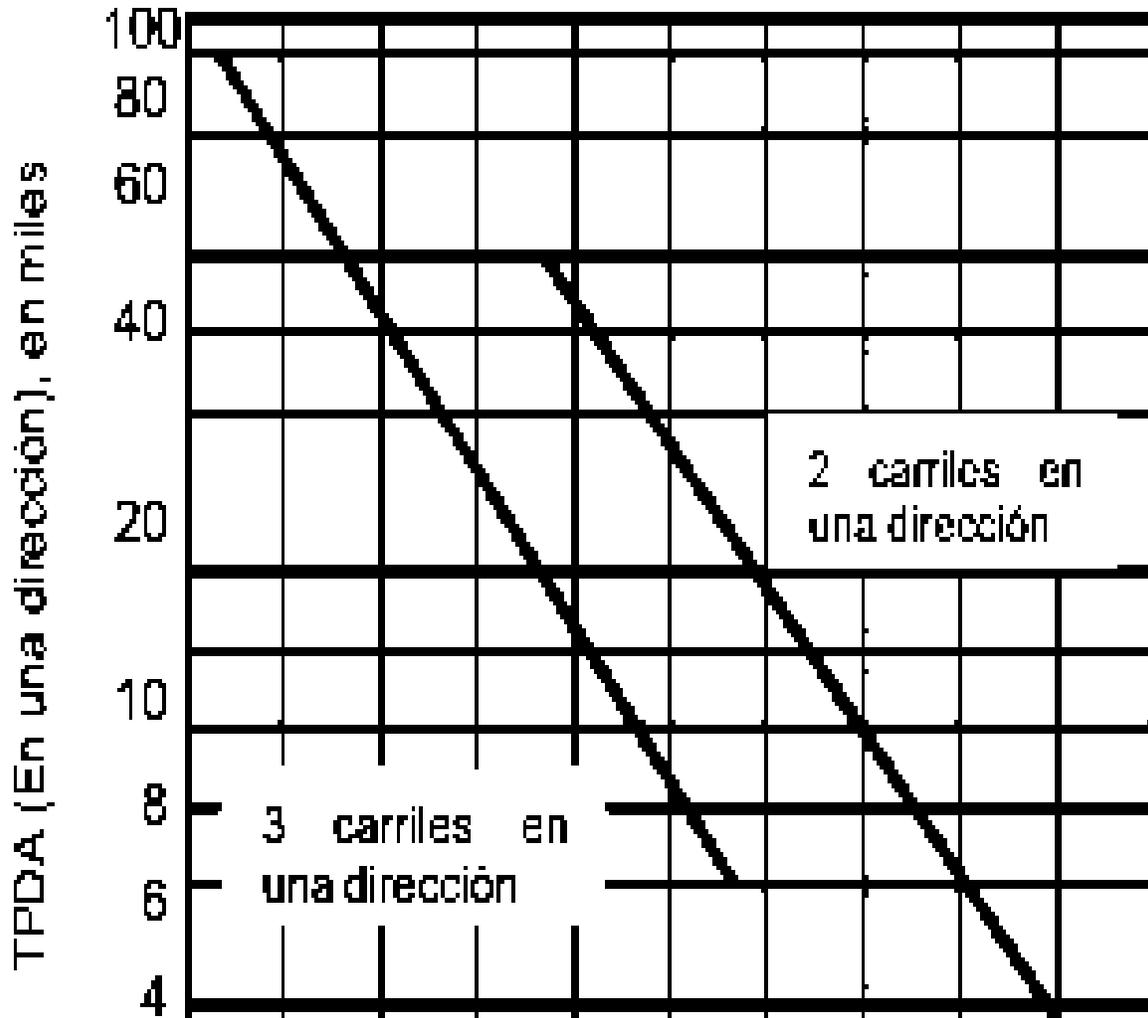


Figura 2.5-4 Proporción de Vehículos circulando por el carril de baja velocidad en una vialidad de 2 ó 3 carriles.

5.5. FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA

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.

Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- 1.3 Casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y cero mantenimiento.
- 1.2 Para Autopistas ó vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado.
- 1.1 Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado.
- 1.0 Caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado

CAPÍTULO VI: PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El método descrito en ésta sección es empleado una vez que ya tenemos los datos del tráfico esperado, como lo es el tránsito diario promedio anual, la composición vehicular del tráfico y de esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el período de diseño.

En la figura 2.5-5 se presenta un formato empleado para resolver el diseño de pavimentos, el cual requiere de conocer algunos factores de diseño, como:

- Tipo de junta y acotamiento.
- Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- El valor del módulo de reacción K del terreno de apoyo.
- Factor de seguridad de la carga (LSF)
- Número de repeticiones esperadas durante el período de diseño, para cada tipo y peso de eje.

El método considera dos criterios de diseño:

- Fatiga**
- Erosión**

El Análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen ó pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas en las juntas.

El análisis por erosión (el responsable de controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas) influye principalmente el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Para pavimentos que tienen una mezcla normal de pesos de ejes, las cargas en los ejes sencillos son usualmente más severas en el análisis por fatiga y las cargas en ejes tandem son más severas en el análisis por erosión.

El diseño del espesor se calcula por tanteos con ayuda del formato de diseño de espesores por el método de la PCA que se presenta en la tabla 2.5.4. Los pasos en el procedimiento de diseño son como siguen: primero cargamos los datos de entrada que se presentan en la tabla 2.5.4 (columna 1 a la 3), los datos de la columna 2 son las cargas por eje multiplicadas por el factor de seguridad de carga.

6.1 ANÁLISIS POR FATIGA.

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

Sin apoyo lateral.

- Use la tabla 2.5.5 y la figura 2.5.5

Con apoyo lateral.

- Use la tabla 2.5.6 y la figura 2.5.5

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 2.5.5 y 2.5.6), 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 le llamamos relación de esfuerzos y vamos a obtener una para cada tipo de eje (sencillo, tándem y tridem). Estos valores los anotamos en el formato de diseño de espesores (tabla 2.5.4) en las celdas 9, 12 y 15.

3. Llenar la columna 4 de “repeticiones permisibles” obtenidas en la figura 2.5.5

4. Obtener el % de fatiga de cada eje. El % 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 de daño por fatiga.

6.2 ANÁLISIS POR EROSIÓN

Sin apoyo lateral.

- Para pavimentos con pasajuntas, emplear la tabla 2.5.7 y la figura 2.5.6
- En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados, use la tabla 2.5.8 y la figura 2.5.6

Con apoyo lateral.

- Para pavimentos con pasajuntas o continuamente reforzados, emplear la tabla 2.5.9 y la figura 2.5.7
- En los pavimentos en que la transferencia de carga se realiza exclusivamente mediante la trabazón de los agregados, use la tabla 2.5.10 y la figura 2.5.7

Ejes Tandem

52	62.4	21,320	1,100,000	1.9	920,000	0.4
48	57.6	42,870	ilimitado	0	1,500,000	0.7
44	52.8	124,900	ilimitado	0	2,500,000	0.9
40	48.0	372,900	ilimitado	0	4,600,000	1.1
36	43.2	885,800	ilimitado	0	9,500,000	1.0
32	38.4	930,100	ilimitado	0	24,000,000	1.0
28	33.6	1,656,000	ilimitado	0	92,000,000	0.5
24	28.8	984,900	ilimitado	0	ilimitado	0
20	24.0	1,227,000	ilimitado	0	ilimitado	0
16	19.2	1,356,000	ilimitado	0	ilimitado	0

14. Esfuerzo equivalente

147

16. Factor de Erosion

2.95

15. Factor de relación de esfuerzo

0.226**Ejes Tridem**

54/3=18	21.6	250,000	ilimitado	0	2,600,000	9.6
---------	------	---------	-----------	---	-----------	-----

TOTAL	62.9	TOTAL	48.3
--------------	-------------	--------------	-------------

**Tabla 2.5.5 Esfuerzo Equivalente para Pavimentos Sin Apoyo Lateral.
Esfuerzo Equivalente - Sin Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	489	618	500	380	571	460	359	540	435	349	498	408	339	468	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	268
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	269	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	166	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	159	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	189	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	98	85	65	88	78	59

**Tabla 2.5.6 Esfuerzo Equivalente para Pavimentos Con Apoyo Lateral.
Esfuerzo Equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	371	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	308	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	226	294	251	198	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	199	158	220	184	149	209	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	134	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

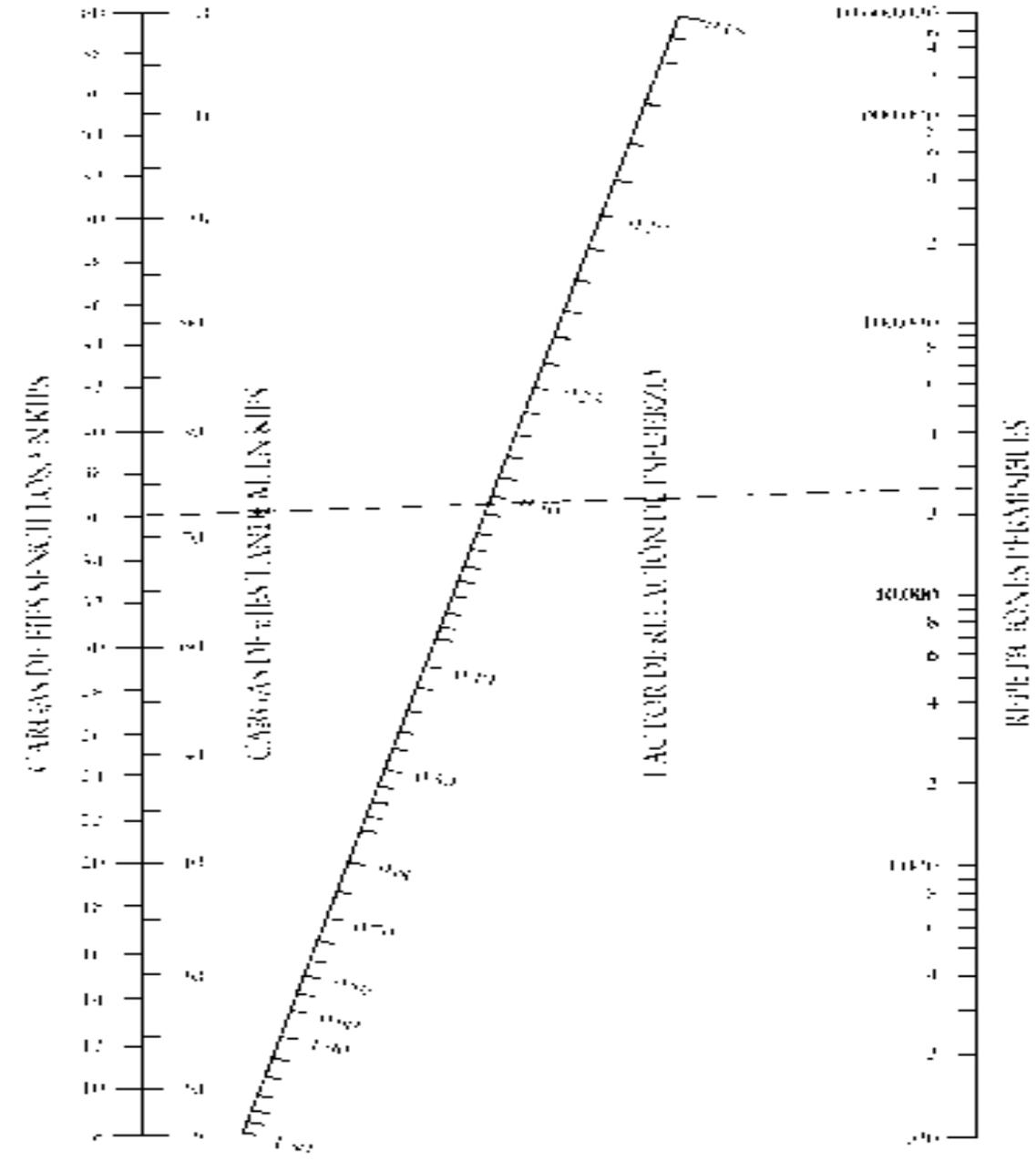


FIGURA 2.5.5. Análisis de fatiga (Repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral).

**No. 2.5.7 - Factores de Erosión, para Pavimentos Con Pasajuntas y Sin Apoyo Lateral.
Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.91	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.83
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.83	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.80	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.38
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

**Tabla No. 2.5.8 - Factores de erosión, para Pavimentos Sin Pasajuntas y Sin Apoyo Lateral.
Factores de Erosión - Sin Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.91	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.33	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.19	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.28	3.31	3.01	3.18	3.20	2.99	3.10	3.14	2.98	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.83	2.96
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.76
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.49

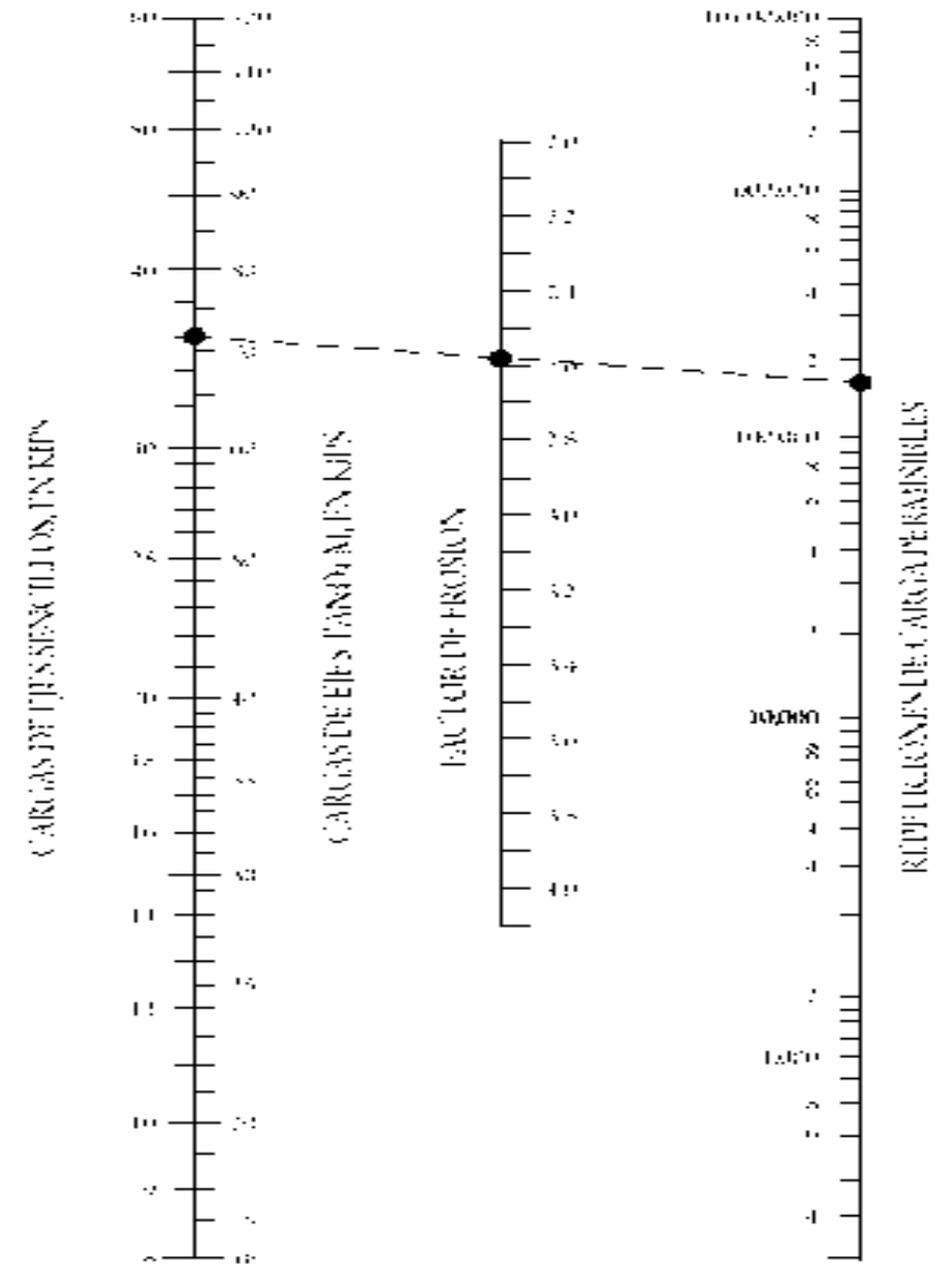


Figura 2.5.6 Análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).

**Tabla No. 2.5.9 - Factores de Erosión, para Pavimentos Con Pasajuntas y Con Apoyo Lateral.
Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.95	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.82	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.98	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.98	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.38	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.04	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Tabla No. 2.5.10 - Factores de Erosión, para Pavimentos Sin Pasajuntas y Con Apoyo Lateral. Factores de Erosión - Sin Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral. Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.46	3.49	3.50	3.42	3.99	3.98	3.98	3.92	3.90	3.96	3.29	3.25	3.32	3.26	3.21	3.28	3.24	3.16
4.5	3.32	3.39	3.40	3.28	3.28	3.28	3.24	3.19	3.18	3.22	3.16	3.13	3.19	3.12	3.08	3.15	3.09	3.04
5.0	3.20	3.30	3.32	3.16	3.18	3.19	3.12	3.09	3.08	3.10	3.05	3.03	3.07	3.00	2.97	3.04	2.97	2.93
5.5	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.96	2.90	2.87	2.93	2.86	2.83
6.0	3.00	3.15	3.20	2.95	3.02	3.05	2.90	2.92	2.92	2.88	2.87	2.86	2.86	2.81	2.79	2.83	2.77	2.74
6.5	2.91	3.08	3.41	2.86	2.96	2.99	2.81	2.85	2.86	2.79	2.79	2.79	2.76	2.73	2.72	2.74	2.68	2.67
7.0	2.83	3.02	3.09	2.77	2.90	2.94	2.73	2.78	2.80	2.70	2.72	2.73	2.68	2.66	2.65	2.65	2.61	2.0
7.5	2.76	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
8.0	2.69	2.92	3.01	2.60	2.79	2.84	2.57	2.67	2.70	2.55	2.61	2.62	2.52	2.53	2.54	2.50	2.48	2.48
8.5	2.63	2.88	2.97	2.56	2.74	2.80	2.51	2.62	2.65	2.48	2.55	2.58	2.45	2.48	2.49	2.43	2.43	2.43
9.0	2.57	2.83	2.94	2.50	2.70	2.77	2.44	2.57	2.61	2.42	2.51	2.53	2.39	2.43	2.44	2.36	2.38	2.38
9.5	2.51	2.79	2.91	2.44	2.65	2.73	2.38	2.53	2.58	2.36	2.46	2.49	2.33	2.38	2.40	2.30	2.33	2.34
10.0	2.46	2.75	2.88	2.39	2.61	2.70	2.33	2.49	2.54	2.30	2.51	2.46	2.27	2.34	2.36	2.24	2.28	2.29
10.5	2.41	2.72	2.85	2.33	2.58	2.67	2.27	2.45	2.51	2.24	2.38	2.42	2.21	2.30	2.32	2.19	2.24	2.26
11.0	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
11.5	2.32	2.65	2.80	2.24	2.51	2.62	2.17	2.37	2.45	2.14	2.31	2.36	2.11	2.22	2.28	2.09	2.16	2.19
12.0	2.28	2.62	2.78	2.19	2.48	2.59	2.13	2.34	2.54	2.10	2.27	2.33	2.06	2.19	2.23	2.01	2.13	2.16
12.5	2.24	2.59	2.76	2.15	2.45	2.57	2.09	2.31	2.40	2.05	2.24	2.31	2.02	2.15	2.20	1.99	2.10	2.13
13.0	2.20	2.56	2.74	2.11	2.42	2.55	2.04	2.28	2.38	2.01	2.21	2.28	1.98	2.15	2.17	1.95	2.08	2.10
13.5	2.16	2.53	2.72	2.08	2.39	2.53	2.00	2.25	2.36	1.97	2.18	2.26	1.93	2.09	2.15	1.91	2.03	2.07
14.0	2.13	2.51	2.70	2.04	2.36	2.51	1.97	2.23	2.33	1.93	2.15	2.24	1.89	2.06	2.12	1.87	2.00	2.05

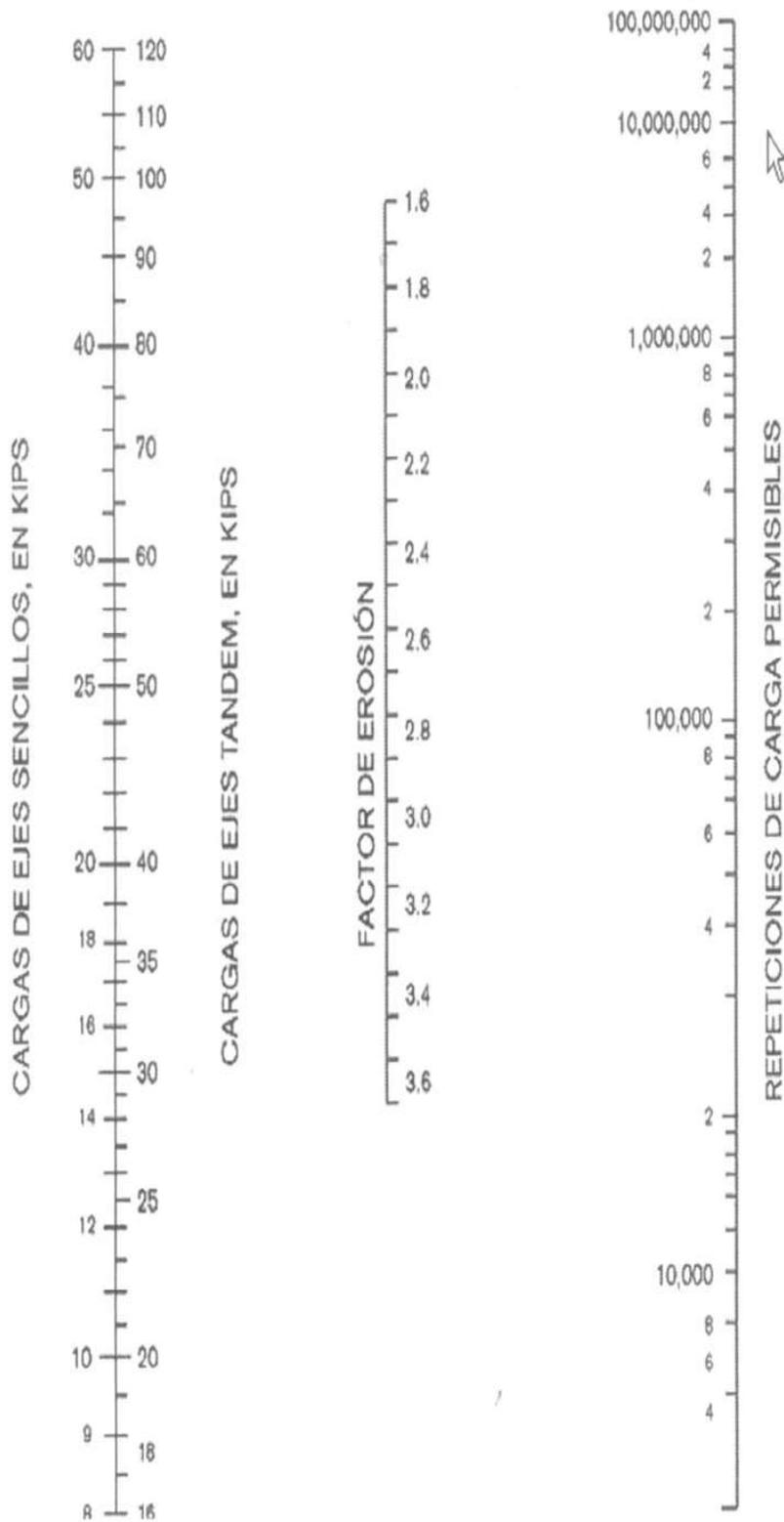


Figura 2.5.7 Análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, con apoyo lateral).

6.3 EJEMPLO DE DISEÑO POR EL METODO DE LA PCA.

DATOS:

Vialidad Urbana de 2 sentidos y de 2 carriles por sentido.

Sin Apoyo Lateral, con pasajuntas

Módulo de Ruptura (MR) del concreto = 650 psi

Módulo de Sub-reacción del Suelo (k) = 100 pci

Base granular de 20 cm

Factor de seguridad de carga de 1.1

Datos del Tráfico:

Período de diseño: 20 años

Tasa de crecimiento anual del tráfico: 3.0 %

Se realizó un aforo durante varios días y además se promedió con el tráfico (ya conocido) de otras vialidades de condiciones muy similares, resultando un tránsito promedio diario anual (TPDA) de 2,267 vehículos en una sola dirección, con la siguiente composición:

Tabla 2.5.11 Tránsito promedio diario anual y su composición para el ejemplo de diseño PCA

TIPO DE VEHICULO	TOTAL DIARIOS	% DEL TPDA	CARGADOS	VACIOS
A2	1,315	58.0%	100%	0%
A'2	493	19.1%	100%	0%
B2	168	7.4%	60%	40%
B4	52	2.3%	60%	40%
C2	202	8.9%	60%	40%
C3	25	1.1%	60%	40%
T2-S2	4	0.2%	60%	40%
T3-S2	56	2.5%	60%	40%
T3-S3	10	0.4%	60%	40%
T3-S2-R4	2	0.1%	60%	40%
	2,267	100.0%		

SOLUCION:

6.3.1. Análisis del tráfico para conocer el número de repeticiones esperadas para cada eje.

6.3.1.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 este ejemplo si los vamos a considerar en el diseño, aún sabiendo que su impacto es mínimo. Por lo que el ADTT equivale al tránsito promedio diario anual (TPDA) dado.

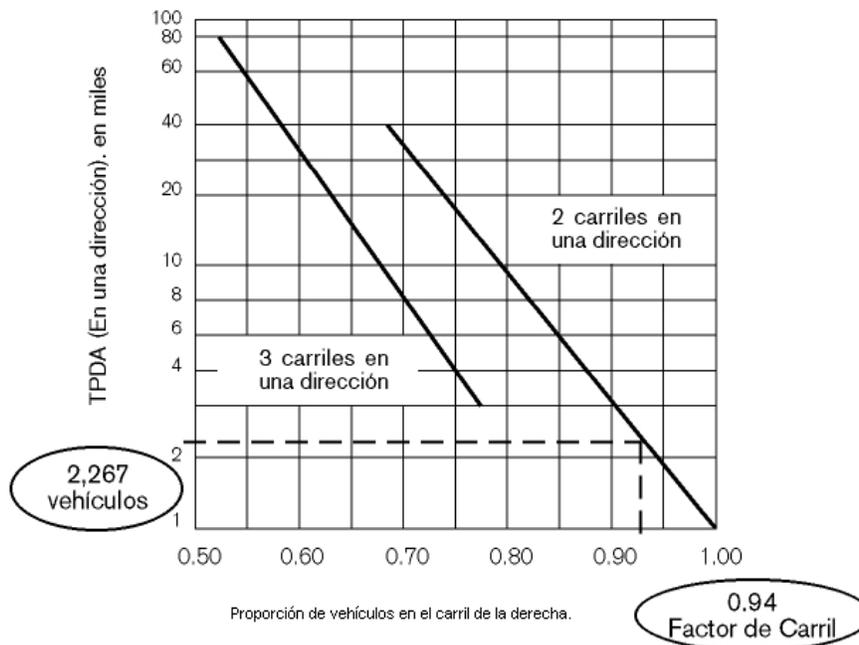
6.3.1.b) Factor de Sentido:

Dado que los datos del aforo son en un solo sentido, entonces el factor de sentido a emplear será de 1.00.

6.3.1.c) Factor de Carril.

En los datos generales del proyecto se menciona que la vialidad cuenta con 2 carriles por sentido, así que para determinar el factor de carril a emplear se utilizará la figura 2.5-4 entrando con el TPDA de 2,267 vehículos (incluyendo los ligeros) hasta encontrar la línea de 2 carriles en una dirección, de manera que obtenemos un 94% vehículos circulando por el carril de la derecha; es decir un factor de carril de 0.94.

Figura 2.5.8 Cálculo del factor de carril para el ejemplo de diseño PCA



6.3.1.d) Factor de Crecimiento Anual.

Para el cálculo del factor del crecimiento anual se emplean los datos de período de diseño igual a 20 años y la tasa de crecimiento anual de 3%, resultando un factor de crecimiento anual de 1.3435.

$$FC = \frac{(1+0.03)^{20}-1}{(0.03)(20)} = 1.3435$$

6.3.1.e) Repeticiones esperadas para cada tipo de eje.

Dado que conocemos los tipos de vehículos y la cantidad de ellos (repeticiones esperadas) que van a circular sobre el pavimento, lo que se hace a continuación es separar la repetición para cada tipo de eje, es decir para cada peso de eje (recordar que tenemos unos cargados y otros vacíos) y para cada tipo como lo son ejes sencillos, tándem ó tridem.

Para efectos del ejemplo únicamente analizaremos un tipo de eje y presentaremos más adelante los resultados de todos los tipos de ejes. El eje sencillo de 6.6 kips únicamente interviene en el conjunto de ejes traseros del camión de 2 ejes (C2), cuando este circula vacío, por lo que las repeticiones esperadas de este tipo de eje será:

En el primer año:

Rep. Esperadas = (Rep. Diarias del eje) x (% Cargado ó Vacío) x (Factor de Sentido) x (Factor de Carril) x (365)

Rep. Esperadas = 202 x 0.40 x 1.0 x 0.94 x 365 Rep. Esperadas = 27,722.48

En toda la vida útil:

Rep. Esperadas = (Rep. 1er año) x (Período de diseño) x (Factor de Crecimiento Anual)

Rep. Esperadas = 27,722.48 x 20 x 1.3435

Rep. Esperadas = 744,903

De igual manera de cómo se calculó las repeticiones permisibles para el eje sencillo de 6.6 kips, se deberá analizar todos los tipos de ejes derivados de la composición vehicular del tránsito promedio diario anual. Los resultados de las repeticiones esperadas para todos los tipos de ejes que intervienen en nuestros proyectos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.5.11 Repeticiones esperadas para cada tipo de eje en el ejemplo de diseño PCA

TIPO DE EJE	PESO EN KIPS	REPETICIONES AL AÑO	REPETICIONES EN LA VIDA ÚTIL
Sencillo	2.20	902,353	24,246,563
Sencillo	3.74	148,562	3,991,917
Sencillo	6.60	27,723	744,903
Sencillo	7.70	51,300	1,378,450
Sencillo	8.36	148,562	3,991,917
Sencillo	8.80	13,244	355,871
Sencillo	12.10	96,075	2,581,571
Sencillo	15.40	23,056	619,523
Sencillo	22.00	76,950	2,067,675
Tándem	7.04	288	7,739
Tándem	7.26	288	7,739
Tándem	7.70	288	7,739
Tándem	8.80	17,553	471,656
Tándem	9.90	3,376	90,714
Tándem	11.00	7,164	192,499
Tándem	15.40	10,746	288,749
Tándem	17.60	7,164	192,499
Tándem	30.80	10,746	288,749
Tándem	39.60	32,691	878,419
Tridem	*11.00	1,400	37,619
Tridem	*49.50	2,100	56,428

El peso por eje de los ejes tridem, se deberá dividir entre tres para poder emplear la escala de los ejes sencillos en los nomogramas de repeticiones permisibles tanto de fatiga como de erosión (figuras 2.5.5, 2.5.6 y 2.5.7).

6.3.2. Cálculo del Módulo de sub-reacción (k) de diseño.

El valor de $k = 100$ pci es del terreno natural y como tenemos una base granular de 20 cm, la k se modifica, resultando la k del conjunto suelo - subbase a un valor de 153.33 pci (=150 pci para simplificar el ejemplo), de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.5.12 Cálculo de la k de conjunto suelo-subbase para el ejemplo de diseño PCA

k Suelo - Sub-base (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

6.3.3. Esfuerzo Equivalente.

Con los datos de un espesor inicial de 8.5" y una k de diseño de 150 pci, entramos a la siguiente tabla para encontrar los esfuerzos equivalentes para los ejes sencillo, tándem y tridem, resultando de 234, 208 y 158 respectivamente.

Tabla 2.5.12 Cálculo del esfuerzo equivalente para los ejes sencillos, tandem y tridem en el ejemplo de diseño PCA.

**Esfuerzo Equivalente - Sin Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.**

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																										
	50			100			150			200			300			500			700								
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri						
4.0	825	679	510	726	585	453	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412						
4.5	699	566	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	488	378	331	417	363	328						
5.0	602	516	387	531	436	323	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269						
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226						
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193						
6.5	417	380	289	367	317	233	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168						
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148						
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132						
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120						
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109						
9.0	264	264	200	232	218	168	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101						
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93						
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87						
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82						
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78						
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	98	123	107	80	116	98	74						
12.0	177	192	138	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	86	116	102	77	109	93	70						
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67						
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64						
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64						
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59						

6.3.4. Relación de Esfuerzos.

La relación de esfuerzos se calcula dividiendo el esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura, por lo que la relación de esfuerzos para los ejes sencillos será de 0.36, para los ejes tandem será de 0.32 y finalmente para los ejes tridem de 0.24.

6.3.5. Análisis por Fatiga.

Para calcular las repeticiones permisibles para cada tipo de eje por el análisis por fatiga se emplea un nomograma, el peso y tipo del eje, así como su relación de esfuerzos.

En el caso del eje sencillo de 22 kips, se entra a la figura con la carga ya multiplicada por su factor de seguridad; es decir que la carga en el eje será de 24.2 kips, se une con el valor de relación de esfuerzo de 0.36, de manera que uniendo los dos

puntos con una línea recta y extendiéndola hasta la escala de repeticiones permisibles, encontramos el valor de 3'000,000 de repeticiones permisibles para eje en específico.

Este mismo procedimiento se hace para todos los ejes y se van anotando las repeticiones permisibles encontradas en la columna 4 del formato de hoja de cálculo para el diseño de espesores que se presenta en la figura 2.5.9. A continuación se detalla de manera gráfica las repeticiones permisibles para un solo tipo de eje (el eje sencillo de 24.2 kips). El resto de los ejes ya se presentan los resultados de repeticiones permisibles en la columna 4 de la figura 2.5.9.

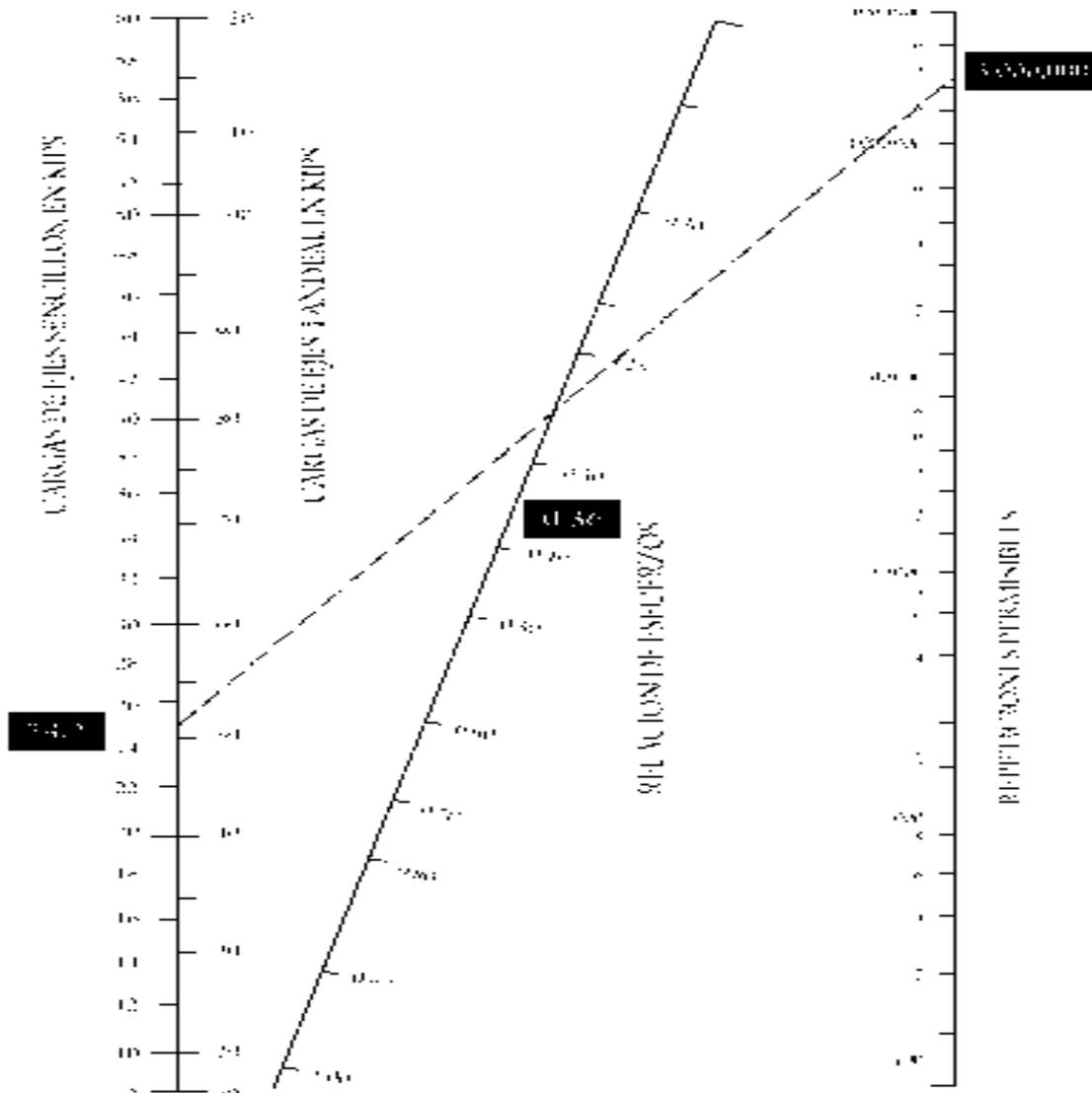


Figura No. 2.5.9 Repeticiones esperadas para el eje sencillo de 24.2 kips, en el ejemplo de diseño PCA.

En el caso de los ejes tridem, la carga total del eje tridem se divide entre tres y el resultado es el valor de carga que se usa en la escala de ejes sencillos para el cálculo de repeticiones permisibles, usando su correspondiente factor de esfuerzo equivalente.

Una vez calculadas todas las repeticiones permisibles, se procede a calcular el % de daño por fatiga. Esto se hace expresando como porcentaje la relación entre las repeticiones esperadas y las repeticiones permisibles, por ejemplo para el caso del eje sencillo de 24.2 kips tenemos 2'067,675 repeticiones esperadas contra un total de 3'000,000 de repeticiones permisibles, por lo que el % de daño de ese eje equivale a un 68.9% de daño por fatiga.

6.3.6. Análisis por Erosión.

En el análisis por erosión se calcula primero el factor de erosión, y para esto se emplean las tablas correspondientes dependiendo de si se cuenta ó no con pasajuntas y además si se tiene ó no apoyo lateral, encontrándose un factor de erosión para cada tipo de eje (sencillo, tándem y tridem).

En este ejemplo se utiliza la tabla 2.5.7 que le corresponde a los pavimentos con pasajuntas y sin apoyo lateral. Con los datos de espesor igual a 8.5" y un $k = 150$ encontramos como se muestra en la tabla 2.5.13 los valores de factor de erosión de 2.73 para los ejes sencillos, de 2.90 para los ejes tándem y 3.03 para los ejes tridem.

Tabla 2.5.13 Cálculo del factor de erosión para un pavimento con pasajuntas y sin apoyo lateral,
para el ejemplo de diseño PCA.
Factores de Erosión- Con Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem.

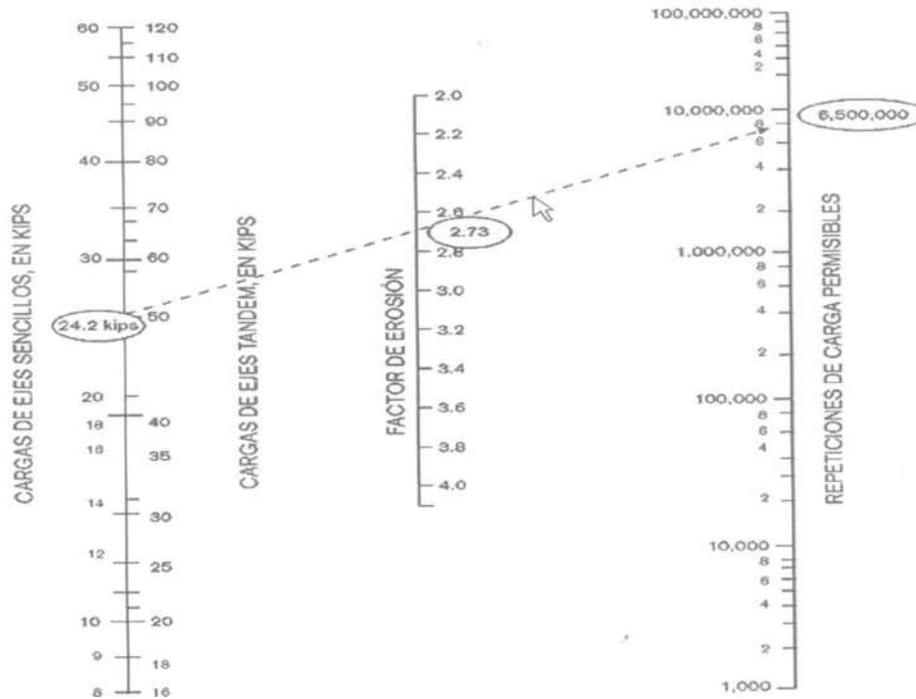
Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																										
	50			100			200			300			500			700											
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri									
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53									
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44									
5.0	3.45	3.58	3.66	3.43	3.52	3.56	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34									
5.5	3.33	3.47	3.55	3.31	3.40	3.44	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25									
6.0	3.22	3.38	3.51	3.20	3.29	3.33	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.18									
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.08	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08									
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00									
7.5	2.93	3.14	3.31	2.91	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93									
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86									
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.76	2.84	2.68	2.75	2.79									
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73									
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.84	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68									
10.0	2.56	2.85	3.05	2.54	2.76	2.94	2.54	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63									
10.5	2.51	2.81	3.01	2.47	2.71	2.90	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58	2.41	2.51	2.58									
11.0	2.47	2.77	2.97	2.42	2.67	2.86	2.39	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54	2.35	2.45	2.54									
11.5	2.43	2.73	2.93	2.36	2.62	2.82	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50	2.29	2.40	2.50									
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46									
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42									
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39									
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35									
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.18	2.32									

Ahora con los valores de factor de erosión y con las diferentes cargas en el eje y con ayuda de la figura correspondiente (que en este ejemplo es la figura para pavimentos sin apoyo lateral) encontramos las diferentes repeticiones permisibles por erosión.

Para efectos del ejemplo, únicamente se explicará el caso del eje sencillo de 24.2 kips y con su correspondiente factor de erosión de 2.73, obtiene un número de repeticiones esperadas igual 7'500,000 como podemos ver en la figura 2.5.10

Empleando la misma figura (figura 2.5.6 para el cálculo de las repeticiones permisibles por el análisis de erosión, para pavimentos sin apoyo lateral) se deberán determinar las repeticiones esperadas para el resto de los ejes, recordando que en el caso de los ejes tridem, la carga total del eje se deberá dividir entre 3, después multiplicar por el factor de seguridad de carga y el resultado es la carga que se considera en la gráfica, en la escala de los ejes sencillos.

Figura 2.5.10 Cálculo de las repeticiones permisibles por erosión para el eje sencillo de 24.2 kips en el ejemplo de diseño de la PCA



6.3.7.- RESULTADOS.

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.

Tabla 2.5.14 Resultados del tanteo con 8.5" de espesor de pavimento, para el ejemplo de diseño del método PCA.

CALCULO DE ESPESOR DEL PAVIMENTO

PROYECTO: Ejemplo de Diseño PCA

ESPESOR INICIAL:

MÓDULO DE REACCION K, DE LA SUBRASANTE:

MÓDULO DE RUPTURA, MR:

FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA, LSF:

8.5 in

150 pci

650 psi

1.1

PASAJUNTAS: SI NO

APOYO LATERAL: SI NO

PERÍODO DE DISEÑO(AÑOS): 20

COMENTARIOS: 8" de base granular

Carga del eje, en kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Permisible (FIG.2.5.5)	% de Fatiga	Repeticiones permisibles (FIG 2.5.6)	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente

234

10. Factor de Erosion

2.73

9. Factor de relación de esfuerzo

0.360

Ejes Sencillos

2.2	2.4	24,246,563	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3.74	4.1	3,991,917	ilimitadas	0	ilimitadas	0
6.6	7.3	744,903	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7.7	8.5	1,378,450	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8.36	9.2	3,991,917	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8.8	9.7	355,871	ilimitadas	0	ilimitadas	0
12.1	13.3	2,581,571	ilimitadas	0	ilimitadas	0
15.4	16.9	619,523	ilimitadas	0	ilimitadas	0
22	24.2	2,067,675	3,000,000.00	68.92	7,500,000	27.57
Sub Total Ejes Sencillos				68.92		27.57

11. Esfuerzo equivalente

208

13. Factor de Erosion

2.90

12. Factor de relación de esfuerzo

0.320

Ejes Sencillos

2.2	2.4	24,246,563	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3.74	4.1	3,991,917	ilimitadas	0	ilimitadas	0
6.6	7.3	744,903	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7.7	8.5	1,378,450	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8.36	9.2	3,991,917	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8.8	9.7	355,871	ilimitadas	0	ilimitadas	0
12.1	13.3	2,581,571	ilimitadas	0	ilimitadas	0
15.4	16.9	619,523	ilimitadas	0	ilimitadas	0
22	24.2	2,067,675	3,000,000.00	68.92	7,500,000	27.57
Sub Total Ejes Sencillos				68.92		27.57

11. Esfuerzo equivalente

208

13. Factor de Erosion

2.90

12. Factor de relación de esfuerzo

0.320

Ejes Tandem

7.04	7.7	7,739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7.26	8.0	7,739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7.7	8.5	7,739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8.8	9.7	471,656	ilimitadas	0	ilimitadas	0
9.9	10.9	90,714	ilimitadas	0	ilimitadas	0
11	12.1	192,499	ilimitadas	0	ilimitadas	0
15.4	16.9	288,749	ilimitadas	0	ilimitadas	0
17.6	19.4	192,499	ilimitadas	0	ilimitadas	0
30.8	33.9	288,749	ilimitadas	0	2,300,000	12.55
39.6	43.6	878,419	ilimitadas	0	3,500,000	25.10
Sub Total Ejes Tandem				0.00		37.65

14. Esfuerzo equivalente

158

16. Factor de Erosion

2.55

15. Factor de relación de esfuerzo

0.243

Ejes Tridem

= 11.00 / 3	4.0	37,619	ilimitadas	0	ilimitadas	0
= 49.5 / 3	18.2	56,428	ilimitadas	0	5,000,000	1.13
Sub Total Ejes Tridem				0.00		1.13

TOTAL FATIGA 68.9

TOTAL EROSIÓN 66.35

Porque los daños totales por fatiga y por erosión son ambos inferiores al100%, el diseño es adecuado. Sin embargo se deberá realizar otro tanteo con un espesor menor al de este tanteo para revisar si los daños por fatiga y por erosión son ó no superiores al 100%, es decir que se deben hacer varios tanteos para optimizar el diseño del espesor,

siendo el adecuado aquél espesor que provoque daños lo más cercano posible al 100% sin rebasarlo.

Se realizó otro tanteo con un espesor de 8" y se pudo conocer que con tal espesor los daños son superiores al 100%, por lo que el espesor de 8.5" es correcto.

CAPÍTULO VII: DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El método de diseño de la PCA incluye un aspecto novedoso en el procedimiento de diseño, el criterio de erosión, que es ahora tomado en cuenta, junto con el criterio de fatiga.

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga.

Esta sección explica las bases de estos criterios y el desarrollo de procedimiento de diseño.

7.1 ANÁLISIS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

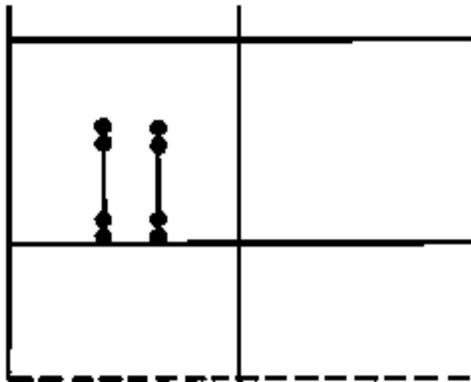
El procedimiento de diseño está basado en un minucioso análisis de esfuerzos en el concreto y deformaciones en las juntas, esquinas y bordes del pavimento, por un programa de computadora de elemento finito. El análisis consideró losas con dimensiones finitas, colocación variable de las cargas por eje y el modelaje de la transferencia de carga en las juntas transversales ó grietas, así como también en las juntas ubicadas entre el pavimento y el acotamiento.

Después de analizar diferentes posiciones de los ejes en la losa, se ha encontrado la posición crítica y se muestra en la figura 2.5.11, con las siguientes conclusiones:

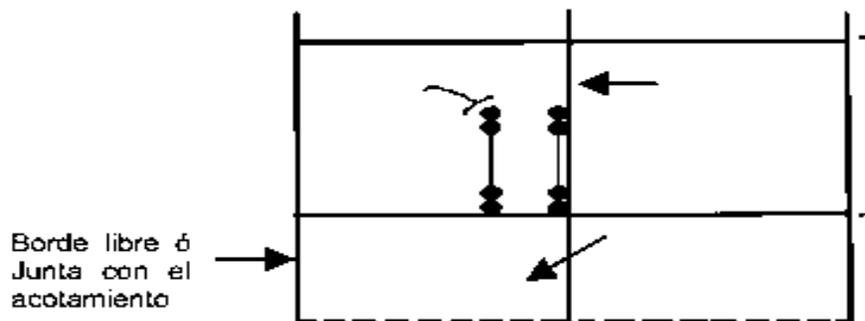
. Los esfuerzos críticos en el pavimento ocurren cuándo el camión es colocado cerca o sobre los bordes del pavimento y a la mitad de las juntas transversales (figura 2.5.11). Dado que las juntas se encuentran a la misma distancia de esta ubicación, el espaciamiento de las juntas transversales y el tipo de transferencia de carga tienen muy poco efecto en la magnitud de los esfuerzos. En el procedimiento de diseño, debido a eso, el análisis basado en los esfuerzos de flexión y fatiga producen los mismos valores para diferentes espaciamientos de juntas y diferentes mecanismos de transferencia de carga en las juntas transversales. Cuando el pavimento central se apoya lateralmente en un carril de acotamiento, la magnitud de los esfuerzos críticos se ve considerablemente reducida.

. 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 2.5.11 inciso b). 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 sí tiene un gran efecto. Esto significa que los resultados del diseño basados en el criterio de erosión (deformaciones) puede ser substancialmente afectado por el tipo de transferencia de carga seleccionado, especialmente cuando se tiene un alto volumen de tráfico pesado. El tener apoyo lateral también reduce considerablemente las deformaciones en las esquinas de las losas.

Figura 2.5.11 Posición crítica de las cargas del eje.



a) Ubicación de las cargas de eje críticas para los esfuerzos a flexión.



b) Ubicación de las cargas de eje críticas para las deformaciones.

7.2 UBICACIÓN DE LAS CARGAS

Las cargas de los camiones ubicados en el borde exterior del pavimento provoca las condiciones más severas que cualquier otra ubicación de las cargas. Si esta ubicación del camión la movemos unas cuantas pulgadas al interior del pavimento, el efecto decrece substancialmente.

Solamente una pequeña fracción de todos los camiones circulan con sus llantas exteriores sobre los bordes del pavimento. La mayoría de los camiones circulando sobre el pavimento se ubican con sus llantas exteriores aproximadamente a una distancia de 60 centímetros del borde del pavimento.

Para el procedimiento de diseño de este método, la condición más severa es supuesta con un 6 % de camiones en el borde, esto para estar del lado de la seguridad. Al

incrementar la distancia hacia el interior del pavimento, la frecuencia de las repeticiones de carga aumenta mientras que disminuye la magnitud de los esfuerzos y las deformaciones.

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. Como resultado de esto, las distribuciones fueron analizadas y se prepararon técnicas de fácil aplicación para propósitos de diseño.

Para análisis de esfuerzo por fatiga, la fatiga fue calculada en incrementos de fracciones de pulgadas hacia el interior desde el borde de la losa, para diferentes distribuciones de ubicación del camión; obteniéndose los factores de esfuerzo de borde equivalente como se muestra en la figura 2.5.12 (Este factor, al multiplicarse por esfuerzos de borde nos da el mismo grado de consumo de fatiga que resultaría de una distribución de ubicación del camión específica.) La condición más severa de 6% de intromisión de los camiones ha sido incorporada en las tablas de diseño.

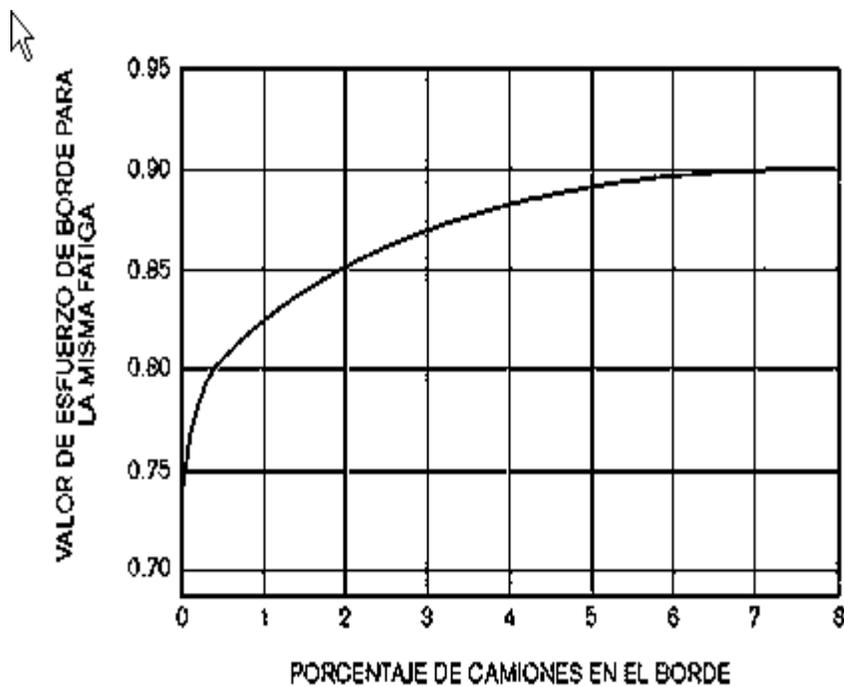


Figura. 2.5.12 Factores de esfuerzo de borde equivalentes dependiendo del porcentaje de camiones en el borde.

Para el análisis de erosión que involucra las deformaciones en la esquina de la losa, el caso más severo (6% de camiones sobre el borde) es nuevamente supuesto. Cuando no existe apoyo lateral, las cargas en las esquinas (6% de los camiones) son críticas, y cuando no se cuenta con apoyo lateral, el mayor número de cargas hacia el interior de la esquina del pavimento (94% de los camiones) son críticas. Estos factores son incorporados a las gráficas de diseño de la siguiente manera:

Porcentaje de daño de erosión = $100 \sum ni(C/Ni)$

Dónde:

ni = número esperado de repeticiones de carga para cada grupo de ejes i.

Ni = número permitido de repeticiones de carga para cada grupo de ejes i.

C = 0.06 para pavimentos sin apoyo lateral. 0.94 para pavimentos con apoyo lateral.

Para ahorrar un paso en el cálculo del diseño, los efectos de (C/Ni) se encuentran en las figuras 2.5.6 y 2.5.7 y las tablas 2.5.7 a la 2.5.10

7.3. VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO.

El procedimiento de diseño reconoce que puede haber variaciones en la resistencia del concreto y así lo manifiesta en sus ecuaciones, nomogramas y tablas de diseño, al reducir en un 15% el módulo de ruptura del concreto. Es importante aclarar que el diseñador no aplica esta reducción directamente al módulo de ruptura, ya que el método automáticamente lo considera.

7.4 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA ATRAVÉS DEL TIEMPO.

La resistencia a los 28 días (módulo de ruptura) es usada como la resistencia de diseño. Sin embargo, este procedimiento de diseño incorpora el efecto de la resistencia del concreto ganado a después de 28 días. Esta modificación está basada en un análisis que, la resistencia incrementada y las repeticiones de carga mes por mes por 20 y 40 años de periodos de diseño. El efecto está incluido en las gráficas y tablas de diseño para que el usuario simplemente dé el valor de 28 días como la resistencia de diseño.

7.5 ALABEO DEL CONCRETO POR GRADIENTES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.

Además de las cargas del tráfico, las losas de concreto también están sometidas a alabeos. El alabeo por humedad es la deformación cóncava hacia arriba de la losa debido a las variaciones de contenido de humedad con la profundidad de la losa y tiene 2 efectos: provoca pérdida de soporte a lo largo de los bordes de la losa y además provoca una restricción en el esfuerzo de compresión en el fondo de la losa. Debido a que el pandeo es un fenómeno a largo plazo, sus efectos avanzan lentamente.

El alabeo de las losas de concreto por variaciones de temperatura se manifiesta durante el día, cuando la superficie está más caliente que la parte inferior, desarrollando esfuerzos de tensión en la parte inferior de la losa. Durante la noche, la distribución de la temperatura se revierte y los esfuerzos de tensión se desarrollan en la parte superior de la losa, además que la distribución de la temperatura no es lineal y cambia constantemente.

Sin embargo, dado que los efectos combinados de los alabeos por variaciones de temperatura y de humedad son muy difícil de medir o evaluar, no se incorporan en este método de diseño.

7.6 Esfuerzo Equivalente.

En el procedimiento de diseño de la PCA, la determinación del esfuerzo equivalente está basado en el esfuerzo máximo de flexión de borde del análisis de elemento finito del software J-Slab, bajo la carga de un eje sencillo y la carga de un eje tándem para diferentes profundidades en el espesor de la losa y módulos de reacción del suelo.

Los parámetros básicos de entrada asumidos son:

Módulo de elasticidad de la losa, $E = 4'000,000$ psi Módulo de Poisson

$\mu = 0.15$ Longitud finita de la losa,

$L = 180$ pulgadas.

Ancho finita de la losa, $W = 144$ pulgadas.

El eje estándar sencillo de 18 kips de carga del eje (llantas dual), con una carga por llanta de 4,500 lbs, llanta con área de contacto de 7×10 in² (radio de carga equivalente de 4.72"), separación entre llantas de 12" y ancho del eje (distancia entre el centro de las llantas dual) $D = 72$ " fue usado para el análisis, así como también se usó un eje estándar tándem de 36 kips de carga en el eje (llantas dual) con separación entre ejes de $t = 50$ " y el resto de las especificaciones idénticas al eje sencillo.

En los casos que se asumió un acotamiento de concreto, se supuso una trabazón de agregado de 25,000 psi. La PCA incorporó además los resultados de un programa de computadora llamado "MATS", desarrollado para el análisis y diseño de losas de cimentación, para estimar el soporte proporcionado por la subrasante, extendiéndose más allá de los bordes de la losa, para una losa sin apoyo lateral.

Lo anterior junto con otros factores de ajuste, concluye en la definición del esfuerzo equivalente (σ_{eq}) como se presenta a continuación:

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * Me}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4$$

$$Me = \begin{cases} \text{Eje Sencillo sin Apoyo Lateral (SA/NS):} \\ -1600 + 2525 * \log(l) + 24.42 * l + 0.204 * l^2 \\ \text{Eje Tandem sin Apoyo Lateral (TA/NS):} \\ 3029 - 2968.8 * \log(l) + 133.69 * l - 0.0832 * l^2 \\ \text{Eje Sencillo con Apoyo Lateral (SA/WS)} \\ (-970.4 + 1202.6 * \log(l) + 53.87 * l) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \\ \text{Eje Tandem con Apoyo Lateral (TA/WS)} \\ (2005.4 - 1980.9 * \log(l) + 99.008 * l) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} \text{Eje Sencillo:} \\ (24/SAL)^{0.08} * (SAL/18) \\ \text{Eje Tandem:} \\ (48/TAL)^{0.08} * (SAL/36) \end{cases} \quad f_2 = \begin{cases} \text{Sin Apoyo Lateral:} \\ 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 \\ \text{Con Apoyo Lateral:} \\ 1.0 \end{cases}$$

$$f_3 = \text{0.894 para un 6\% de camiones en el borde de la losa.} \quad f_4 = 1 / [1/235 * (1 - CV)]$$

Dónde:

σ_{eq} = Esfuerzo equivalente

f_1 = Factor de ajuste debido al efecto de las cargas del eje y áreas de contacto.

f_2 = Factor de ajuste para una losa sin apoyo lateral, basado en los resultados del programa de computadora MATS.

f_3 = Factor de ajuste para valorar el efecto de la ubicación del camión en los esfuerzos de borde (la PCA recomienda un 6 % de intromisión de camiones, lo que resulta un $f_3 = 0.894$)

f_4 = Factor de ajuste para tomar en cuenta el incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo después de los 28 días, además de una reducción de la resistencia por un coeficiente de variación (CV); (la PCA usa un CV = 15%, $f_4 = 0.953$) y de las cargas por eje sencillo (SAL) y tándem (TAL), en kips.

7.6.1 Análisis de Fatiga.

El concepto de análisis de fatiga de la PCA es las fallas del pavimento (ó los agrietamientos iniciales) por la fatiga del concreto debido a los esfuerzos de repeticiones de carga. Basándose en la hipótesis de Miner, es decir, que la resistencia a la fatiga no consumida por la repetición de una carga está disponible para las repeticiones de otras

cargas, el procedimiento de diseño de la PCA permite que el diseñador elija un espesor inicial, calcule la relación de esfuerzos, es decir la relación entre el esfuerzo equivalente y el módulo de ruptura del concreto (relación de esfuerzos= σ_{eq} / MR) para cada carga de eje y tipo de eje, para después determinar el número máximo de repeticiones permisibles (N_f), dependiendo del rango de relación de esfuerzos.

Para $\sigma_{eq} / MR \geq 0.55$

$\text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / MR)$

Para $0.45 < \sigma_{eq} / MR < 0.55$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\left(\frac{\sigma_{eq}}{MR} \right) - 0.4325} \right)^{3.268}$$

Para $\sigma_{eq} / MR \geq 0.45$

$N_f =$ ilimitado

El procedimiento de diseño continúa dividiendo el número esperado de repeticiones de carga entre las repeticiones permisibles (N_f) para de esa manera obtener el daño por fatiga para cada carga y tipo de eje. Posteriormente se suman los daños provocados por cada tipo de eje y el daño total por fatiga deberá ser inferior al 100 %, por lo que se deberán hacer varios tanteos de espesor y el óptimo será aquel que provoque el daño más cercano al 100 % sin sobrepasarse.

7.6.2 Análisis de Erosión

Las fallas del pavimento tales como bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencia de elevación en las juntas son relacionadas más a las deflexiones del pavimento que a sus esfuerzos a flexión. La deflexión más crítica en la esquina de la losa cuando la carga del eje se ubica en la junta cerca de la esquina como lo muestra la figura 2.5.11 inciso b.

La falla principal en la prueba AASHTO de camino fue el bombeo o la erosión de la base granular bajo la losa. Sin embargo no se pudieron obtener correlaciones confiables entre las deflexiones de la esquina de la losa y el comportamiento de estos pavimentos, se encontró que para predecir el comportamiento de los pavimentos se deben aplicar diferentes criterios de deflexión, dependiendo del espesor de la losa y un poco en el módulo de reacción del suelo. Una correlación mejor se obtuvo relacionando el comportamiento de los pavimentos con su valor de trabajo definido como un producto de la deflexión en la esquina (w) y la presión (p) en la interface de la losa con el suelo, dividido por la longitud de la cavidad de la deflexión, la cual es función del valor de rigidez relativa (I).

El concepto es que una losa delgada con una deflexión pequeña recibe más rápido el golpe de la carga que una losa con mayor espesor. Las siguientes ecuaciones fueron desarrolladas para calcular el número permisible de repeticiones de carga:

$$\text{Log } N = 14.524 - 6.777 (C1P - 9.0)^{0.103}$$

Dónde:

N = Numero de repeticiones permisibles de carga basadas en un índice de serviciabilidad presente de 3.0

C1 = Factor de ajuste con valor de 1.0 para bases granulares y de 0.9 para bases mejoradas con cemento

P = Trabajo, definido por la siguiente ecuación:

$$P = 268.7 \frac{p^2}{h \cdot k^{0.75}}$$

Dónde:

p = Presión en la base, bajo la esquina de la losa, igual a k*w para una cimentación líquida y sus unidades son psi.

h = Espesor de la losa en pulgadas.

k = Módulo de reacción del suelo en pci (libras sobre pulgada cúbica)

La ecuación para obtener el daño por erosión es:

$$\% \text{de daño por erosión} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C2n_i}{N_i}$$

Dónde:

C2= 0.06 para pavimentos sin apoyo lateral y 0.94 para pavimentos con apoyo lateral.

Con apoyo lateral, la deflexión en la esquina no se afecta significativamente por la ubicación de los camiones y por esa razón se puede usar un C2mayor.

n_i= Repeticiones esperadas para el eje i.

N_i = Repeticiones permisibles para el eje i.

La ecuación anterior es en donde se suman los porcentajes de daño de cada tipo de eje y el análisis de erosión también debe arrojar un resultado final inferior al 100 %.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

Los dos métodos de diseño descritos en este Sistema de Diseño de Pavimentos de Concreto, el de la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) y el de la Portland Cement Association (PCA) corresponden a los métodos de diseño de espesores de pavimentos más ampliamente usados a nivel mundial. Por este motivo se ha decidido incluir ambos métodos en el Sistema Pavimentos de Concreto.

El método de diseño de la Portland Cement Association es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto.

El método de diseño de la PCA incluye un aspecto adicional en el procedimiento: el criterio de erosión, que es tomado en cuenta, junto con el criterio de fátiga.

El procedimiento de diseño está basado en un minucioso análisis de esfuerzos en el concreto y deformaciones en las juntas, esquinas y bordes del pavimento, por un programa de computadora de elementos finitos. El análisis consideró losas con dimensiones finitas, colocación variable de las cargas por eje y el modelaje de la transferencia de carga en las juntas transversales o grietas, así como también en las juntas ubicadas entre el pavimento y el acotamiento.

VENTAJAS DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO RESPECTO DE LOS PAVIMENTOS DE ASFALTO.

Con el fin de hacer un análisis comparativo entre los pavimentos de asfalto, es necesario mencionar sus ventajas o desventajas de acuerdo a criterios de comparación preestablecidos; en el presente caso, se establecerán los siguientes criterios significativos:

- A. Economía.
- B. Comportamiento.
- C. Diseño.
- D. Mantenimiento.
- E. Construcción.
- F. Energía.
- G. Seguridad.

A continuación se desglosan algunas ventajas de los pavimentos de concreto respecto a los de asfalto, atendiendo a los criterios de comparación anteriores.

a). ECONOMÍA.

Pavimentos de Concreto.

- Costo inicial competitivo.
- El concreto necesita muy poco mantenimiento.
- Amplia disponibilidad de plantas de concreto premezclado.
- Se requiere menor iluminación (bajo costo de alumbrado).
- Mayor vida útil. Más barato por año de vida útil.

- Se reduce el costo de reparación de automóviles.

Pavimentos de Asfalto.

- El costo fluctúa con los precios del petróleo (costo en el mercado internacional).
- Se requiere mantenimiento continuo y costosas reparaciones.
- Escasa disponibilidad de plantas de asfalto.
- Se requiere una mayor iluminación (costo de alumbrado).
- Menor vida útil. Más caro por año de vida útil.
- Surcos y baches en el pavimento causan mayor daño a los automóviles.

b). COMPORTAMIENTO.

Pavimentos de Concreto.

- Mayor vida útil y mejores condiciones de servicio.
- Pueden diseñarse para resistir ataque químico, aceites, intemperismo, etc.
- Pueden soportar mejor las sobrecargas de vehículos, pocas limitaciones de peso (tons.).
- Distribuye más eficientemente las cargas de las llantas requiriéndose así menores espesores de capas subyacentes y/o especificaciones menos rígidas de materiales.
- Soportan el calor y no se reblandecen ni se vuelven “pegajosos”.
- Mejor respuesta en áreas difíciles donde son comunes cargas pesadas, y en sitios donde hay semáforos.

Pavimentos de Asfaltos.

- Limitada vida útil antes de requerir reparación.
- Son afectados por aceites, agentes químicos, clima, etc.
- Vehículos pesados dañan las capas subyacentes.
- Las cargas transmitidas por llantas de camiones pueden provocar falla del pavimento.
- En climas calientes las temperaturas altas provocan “reblandecimiento” del pavimento, superficies “pegajosas”, pérdida de materiales, etc.
- Usualmente fallan en áreas difíciles: calles inclinadas, sitios de semáforos, etc

c). DISEÑO.

Pavimentos de Concreto.

- Se requiere una excavación mínima; usualmente pueden desplantarse sobre la misma terracería o sobre una sub-base de 10 a 15 cms de espesor de suelo granular.
- Se pueden diseñar para cualquier magnitud de carga esperada.
- Su resistencia aumenta con el tiempo.
- Menores normas de iluminación.
- Diseño integral del pavimento y guarniciones (aumentando velocidad de construcción).

Pavimentos de Asfalto.

- Se requiere una mayor excavación para alojar las capas del pavimento, así como mayores volúmenes de acarreo de materiales seleccionados.
- Incertidumbre en su respuesta ante cargas pesadas.
- Su resistencia no aumenta con el tiempo, por el contrario sufre efectos de envejecimiento o oxidación del asfalto.
- Mayores normas de iluminación.
- Diseño separado de pavimento y guarniciones.

d). MANTENIMIENTO.

Pavimentos de Concreto.

- Bajo costo anual; no se requieren presupuestos altos para relleno de juntas.
- Se requiere poco trabajo de limpieza.
- Las reparaciones son uniformes, limpias y fácilmente terminadas.
- Se requieren menos mano de obra y equipo para las reparaciones.

Pavimentos de Asfalto.

- Se requiere “bacheo” rutinario y la colocación de riegos de sello.
- Es necesario un barrido energético, por la acumulación de polvo en las depresiones del pavimento.
- Las reparaciones son irregulares, necesitándose selladores a base de asfalto líquido.
- Se requieren más mano de obra y equipo para hacer las reparaciones.
- Construcción.

e). CONSTRUCCIÓN.

Pavimentos de Concreto.

- Se terminan en una “pasada”.
- Se concluyen los trabajos más rápido; se dispone de plantas premezcladoras en casi cualquier lado.
- Facilidad de construcción; pueden colocarse de una manera simple.
- Pueden colocarse en climas fríos o calientes.

Pavimentos de asfalto.

- Sistema multicapa que requieren varias “pasadas” del equipo de colocación y compactación.
- Escasez de plantas de asfalto.
- Muchos pasos constructivos; pocos contratistas están equipados.
- Puede colocarse únicamente en temporadas de climas cálidos.

f). ENERGÍA.

Pavimentos de Concreto.

- Se fabrican con materiales locales.
- Cualquier reparación se hace con materiales locales.
- No se requiere calentamiento de la mezcla.
- Se consume menos energía para iluminación.

Pavimentos de Asfalto.

- Se fabrica con materiales transportados desde grandes distancias.
- Se repara con el mismo tipo de materiales anteriores.
- Los materiales deben calentarse antes de su colocación.
- Mayor consumo de energía para iluminación debido al color negro.

g). SEGURIDAD.

Pavimentos de Concreto.

- Excelente reflexión de la luz, mayor visibilidad.
- Mayor resistencia al derrape o deslizamiento en condiciones húmedas o secas.

Pavimentos de Asfalto.

- Pobre reflexión de la luz debido a su color oscuro.
- Superficie resbaladiza cuando se humedecen.

BIBLIOGRAFÍA

- Ingeniería de Tránsito.
Fundamentos y Aplicaciones.
Rafael Cal y Mayor R.
James Cárdenas G.
7ª Edición.
Alfaomega.
- Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos
de CEMEX
- Introducción a la Ingeniería de Caminos.
José Alfonso Mier Suárez.
Primera Edición.