

24, 11

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería



HUNDIMIENTO DE LAS PISTAS DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CD. DE MEXICO (ALTERNATIVAS EMPLEADAS PARA SU SOLUCION)

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO CIVIL
P r e s e n t a :

JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ

Director de Tesis: M. en I. Gabriel García Altamirano

México, D. F.

Mayo, 1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-208

Señor JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ,
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Gabriel García Altamirano, para que lo desarrolle como TESIS para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO CIVIL.

"HUNDIMIENTO DE LAS PISTAS DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA
CD. DE MEXICO"
(ALTERNATIVAS EMPLEADAS PARA SU SOLUCION)

- I. Introducción.
- II. Antecedentes históricos de la construcción y rehabilitación de la pista 05D-231 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.
- III. Comportamiento de la pista 05D-231.
- IV. Solución empleada en la rehabilitación de la pista en el año de 1984.
- V. Evaluación preliminar posterior a la rehabilitación.
- VI. Conclusiones y recomendaciones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 9 de agosto de 1985
EL DIRECTOR

DR. OCTAVIO A. RASCON CHAVEZ

ⓐ
OARCH/RCCH/sho.

I N D I C E

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
I.- INTRODUCCION	1
II.- ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA CONSTRUCCION Y REHABILITACION DE LA PISTA 05D-23I DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CD. DE MEXICO	7
III.- COMPORTAMIENTO DE LA PISTA 05D-23I	20
A.- OBSERVACIONES DE CAMPO	21
A.1 Estudios Topográficos	21
A.2 Características de la Sección Estructural de la pista	23
A.3 Características de la Superficie de Roda- miento de la pista	24
B.- PROPIEDADES MECANICAS DEL SUBSUELO	26
B.1 Estratigrafía	28
B.2 Resistencia al Esfuerzo Cortante	31
B.3 Esfuerzos en el subsuelo	32
C.- RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EFECTUADAS	34
IV. - SOLUCION EMPLEADA EN LA REHABILITACION DE LA PISTA EN EL AÑO DE 1984	36
A.- ALTERNATIVAS DE SOLUCION	36
B.- ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS	40
B.1 Alternativa 1	53
B.2 Alternativa 2	61
C.- SOLUCION EMPLEADA	72
V.- EVALUACION PRELIMINAR POSTERIOR A LA REHABILITACION	81
VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFIA	118

A mi MADRE, a quien debo todo en la vida y que con su abnegación, ejemplo, comprensión y amor me ha permitido alcanzar una de mis más preciadas metas que contribuye a la integración de mi plena satisfacción como Ser Humano.

A mi ABUELO, Hombre lleno de virtudes y experiencia con un gran sentido de la vida, que me ha acompañado en todo momento de mi existencia dándome Amor y sabios consejos que han conformado mi carácter.

A mis TIAS, Esperanza y Esther quienes con su apoyo y cariño -- han contribuido en gran medida a mi formación.

A G R A D E C I M I E N T O S

El presente trabajo, fruto de una modesta investigación de mi parte, es fruto también de la rica experiencia que adquirí durante mi paso por la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. sólida institución con la que estoy comprometido y por la que haré todo lo que este de mi parte para lograr que cada día sea mejor. Dicha experiencia es altamente valiosa por la positiva influencia ejercida por mis Compañeros y Maestros.

Dejo constancia de mi más sincero agradecimiento a Todos y cada uno de ellos, en forma especial a Maria de los Angeles Serrato Moreno, gran Compañera y Amiga quién a lo largo de toda la carrera me brindó su más incondicional apoyo, así como al Sr M en I Gabriel Garcia Altamirano por la acuciosidad de su asesoría.

Asimismo, dejo testimonio de gratitud a todas aquellas personas que contribuyeron a la elaboración de éste trabajo, proporcionándome la información necesaria para ello, en especial al Sr Ing. Benjamín Barreda Amigón, Jefe del Departamento Técnico de Areas de Operación de Aeropuertos y Servicios Auxiliares y al Sr. Ing. Francisco Gaytán Rufz Residente General del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, así como a mi gran Amigo el Arquitecto Rodrigo Avalos Jiménez por su valiosa ayuda en la elaboración de los planos de éste trabajo.

C A P I T U L O I

I N T R O D U C C I O N

La aviación comercial en México se inicia en la década de los veinte, operando en las pistas de tierra que ocupaba la aviación militar en los llanos de Balbuena. Por lo dinámico de la industria de la transportación aérea, pronto las autoridades decidieron que no era posible continuar las operaciones comerciales en pistas - destinadas a la aviación militar, obviamente por el peligro que esta práctica entrañaba; y así fué como se ordenó la localización de una nueva área para construir el Aeropuerto de la Ciudad de México que debía servir a la aviación comercial, esto a fines de la década antes citada.

A partir de entonces, dichas instalaciones han ido evolucionando paralelamente con el avance y - requerimientos de la aviación, hasta alcanzar el nivel de desarrollo que ahora se conoce. Este crecimiento de los diferentes elementos de operación terrestre y de las instalaciones en general ha sido progresivo para tratar de - adaptarse día a día a las crecientes exigencias aeronáuticas.

Los pavimentos de las pistas se han ido - transformando gradualmente para satisfacer las necesidades cada vez mayores, motivadas por las constantes innovaciones en los tipos de aeronaves y el incremento de las - operaciones, para lo cuál se ha requerido más longitud, - espesor y ancho de ellas, además de las necesidades anteriores; existe un factor importante que también ha contribuido a las transformaciones antes mencionadas, el terreno de cimentación.

Sobre el particular, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se encuentra ubicado en la zona denominada como zona del Lago de Texcoco cuyo suelo de origen lacustre está constituido en sus estratos superiores y hasta una profundidad media de 58 m. aproximadamente, por arcillas y limos arcillosos de muy alta compresibilidad, susceptible a los asentamientos, aún bajo pequeños incrementos de presión.

Los pavimentos en los aeropuertos se construyen para proporcionar un poder de soporte adecuado a las cargas impuestas por los aviones que las utilizan, debiéndose obtener una superficie libre de deterioros y estable. La superficie de rodamiento debe ser densa y bien ligada para evitar desplazamientos de los agregados, su textura debe ser antiderrapante, pero no demasiado rugosa para evitar el excesivo desgaste de los neumáticos, en resumen, las áreas de operación deben planearse, construirse y mantenerse adecuadamente con el propósito de obtener la máxima seguridad en la operación de las aeronaves.

Para cumplir con estas condiciones, el pavimento debe ser de tal calidad y espesor que le permitan resistir las cargas que se le impongan y transmitir adecuadamente los esfuerzos al terreno sobre el que se encuentre, evitando deformaciones que propicien una falla funcional de la estructura; así como también soportar la acción abrasiva del tránsito aéreo y el intemperismo producido por los agentes naturales.

Los pavimentos flexibles que constituyen las pistas, calles de rodaje, plataformas y vialidades - que integran el Aeropuerto, asentados sobre dichos suelos compresibles, se han visto tradicionalmente afectados por el problema de hundimientos diferenciales cuyas características afectan severamente las condiciones de operación especialmente en las pistas en que las velocidades de despegue y aterrizaje de los aviones sobre el pavimento alcanzan los 250 a 270 Km/Hr.

Se ha comprobado también, que las pistas actualmente están sufriendo un hundimiento general continuo respecto al terreno circundante, debido a su peso -- propio y a los materiales altamente compresibles mencionados anteriormente que se encuentran bajo ella. Por lo anterior la pista en el momento actual y en el futuro se tendrá siempre a un nivel más bajo que el terreno circundante, esto la convierte en una zona de inundación debido a la baja eficiencia del sistema de drenaje para desalojar el agua de lluvia durante una tormenta fuerte y a la serie de encharcamientos producidos en las zonas de la pista que se han visto afectadas por los hundimientos diferenciales.

Otro gran problema que presentan las pistas del Aeropuerto, es la presencia de grietas que se producen en el terreno natural que según la teoría de grietas de tensión del Dr. Eulalio Juárez Badillo se producen en terrenos arcillosos planos de gran extensión y profundidad, expuestos a fuerte evaporación superficial durante las estaciones cálidas y a inundación con láminas pequeñas durante el período de lluvias. Efectivamente, éstas

grietas aparecen en el Aeropuerto cuando las lluvias se han iniciado y deben localizarse y repararse oportunamente para evitar los daños que puedan causar a la estructura de los pavimentos.

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México cuenta a la fecha con dos pistas principales, -- cuya superficie de rodamiento está formada de concreto -- asfáltico que necesitan un mantenimiento continuo para tenerlas en buenas condiciones de operación. Dicho mantenimiento consta principalmente de rehabilitaciones periódicas para nivelar la superficie de rodamiento, restituyendo su acabado, pendiente longitudinal y pendiente transversal (bombeo) para facilitar el drenaje pluvial, así como el bacheo en ciertas zonas localizadas donde se agrieta o hunde el pavimento.

La periodicidad del mantenimiento antes mencionado es tal, que no puede considerarse normal sino que es un proceso continuo lo que origina además de un -- gasto fuerte, la necesidad de tener que interrumpir el -- funcionamiento de alguna de las pistas para efectuar reparaciones de emergencia con las consiguientes molestias en la operación del Aeropuerto.

Aunado a lo anterior, al colocar las sobrecarpetas de concreto asfáltico, éstas actúan como una sobrecarga que en el corto plazo originará nuevos asentamientos diferenciales que vuelven a deformar la superficie de rodamiento. De acuerdo a lo expuesto hasta aquí, se pone de manifiesto la necesidad de realizar este tipo de trabajos de una manera tal que se evite al máximo la -

aparición de nuevos asentamientos diferenciales, es decir evitar la falla funcional del pavimento y por consiguiente prolongar la periodicidad con que éstos se efectúan.

La Dirección General de Aeropuertos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, ha tenido a su cargo los trabajos de renivelación de los pavimentos del Aeropuerto Internacional desde la construcción de éstos y año con año se ha ido adquiriendo una amplia experiencia en la pavimentación de las pistas y en los métodos que se han aplicado para darle solución al problema de los hundimientos y al reflejo de grietas en éstas.

En años recientes, el organismo descentralizado Aeropuertos y Servicios Auxiliares, quién tiene a su cargo la administración y operación de la Red Aeroportuaria Nacional, adquirió la responsabilidad de dar mantenimiento a las instalaciones aeroportuarias para lo cual ha tomado la experiencia de la Dirección General de Aeropuertos a fin de continuar con los trabajos de rehabilitación de las pistas.

El presente trabajo pretende hacer una -- recopilación de esa experiencia, describiendo los antecedentes históricos de las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en cuanto a la construcción de pavimentos se refiere y una reseña de las alternativas -- que se han empleado para atenuar en cierta medida los problemas que se presentan en ellas. Para entender más la situación presente en el Aeropuerto se hará un enfoque -- preciso al caso de la pista 05D-23I con una longitud de - 4,000 m. y un ancho de 45 m. y que hasta la fecha ha sido -

estudiada con más detalle en cuanto a su comportamiento - se refiere, del que se hará un análisis que pondrá de manifiesto el principal problema que sufre la superficie de rodamiento, al distorsionarse como consecuencia de la compresibilidad que experimentan los mantos que constituyen el subsuelo, bajo el incremento de presión aplicado por - el peso propio de las capas de renivelación que sucesivamente se colocan.

Durante la última renivelación general - efectuada a la pista 05D-23I en el año de 1984 por la Gerencia General de Conservación y Mantenimiento de A.S.A. fué empleado un sistema de pavimentación que posteriormente describiremos y el cual ha sido evaluado cuantitativa y cualitativamente para demostrar la bondad de los -- métodos empleados en dicha renivelación y así poder continuar aplicándolo en el futuro en los tramos de pavimento que más lo requieran. Los resultados de esta evaluación y las conclusiones pertinentes al tema de este trabajo, - se discutirán más adelante y estarán basados en el resultado de los trabajos efectuados y del esfuerzo de las personas que se han preocupado por dar solución a éste problema, labor a la que pretende sumarse este trabajo.

C A P I T U L O II

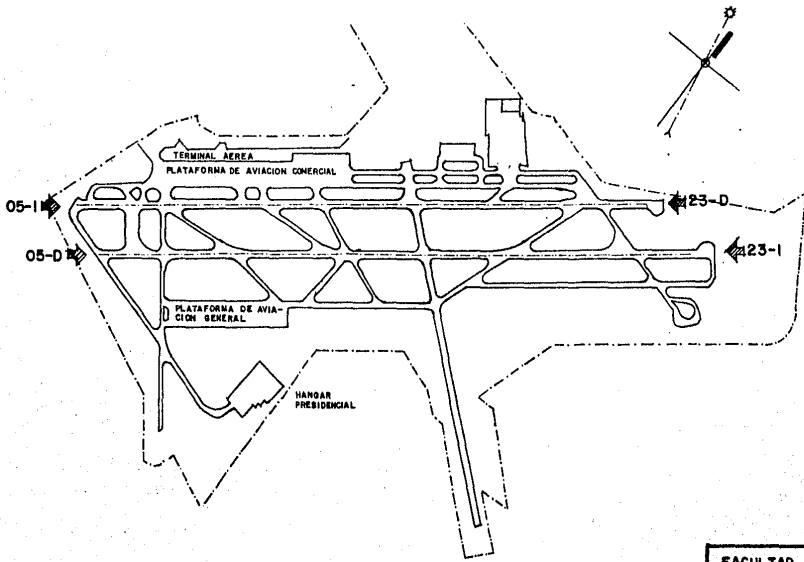
ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA CONSTRUCCION Y REHABILITA -
CION DE LA PISTA 05D-23I DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE
LA CIUDAD DE MEXICO

Los antecedentes del actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se remontan a los inicios de la aviación comercial en nuestro país, pudiendo decirse que para el año de 1924, cuando surge la primera compañía aérea de México, ya existían en el sitio actual las instalaciones y facilidades mínimas indispensables para la operación de las pequeñas aeronaves de la época. A partir de entonces y según los requerimientos cada vez mayores de la aviación las instalaciones han ido evolucionando rápidamente. En la figura 2.1 se puede observar un plano general que muestra las instalaciones con que cuenta actualmente el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Con el fin de interpretar de la mejor manera posible el problema de la rehabilitación de los pavimentos existentes en el Aeropuerto, se considera importante tratar lo referente a la cronología de este tipo de obras, razón por la cual se presentan a continuación los aspectos que marcan las etapas que se han considerado más relevantes, en cuanto a la construcción y rehabilitación de los pavimentos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se refiere y que se puede apreciar gráficamente en la figura 2.2.

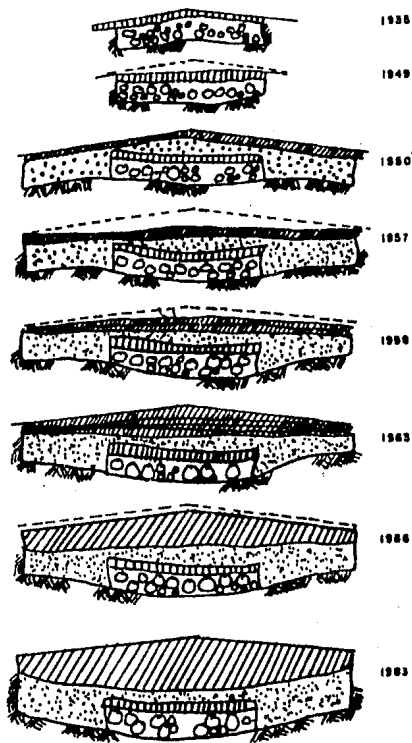
Cuando se inició la aviación en la Ciudad de México solo se usaba una llanura llamada campo de aviación, ubicada en los llanos de Balbuena y que era utilizada por la aviación militar, para que los aviones pudieran realizar sus maniobras de aterrizaje y despegue, no habiéndose efectuado previamente ningún estudio de vientos

AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CD. DE MEXICO




FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	
MAYO 1986	FIGURA 2.1

EVOLUCION DE LA SECCION ESTRUCTURAL DE LA PISTA 05 D - 23 I



SIMBOLOGIA

-  MACADAM ASFALTICO
-  BASE TELFORD
-  GRAVA
-  CONCRETO ASFALTICO

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	FIGURA 2.2
MAYO 1986	

ni de espacios aéreos indispensables para la localización de un Aeropuerto, únicamente se buscaba que la superficie fuera plana y sin depresiones; era el año de 1920, año en que la aviación de aficionados inició formalmente sus -- prácticas.

Por lo dinámico de la industria de la -- transportación aérea, pronto las autoridades decidieron que no era posible continuar las operaciones comerciales en pistas destinadas a la aviación militar y se abocaron en la búsqueda de una nueva área para la realización de -- dichas operaciones aeronáuticas.

Para el año de 1922, se encontró el área deseada y de inmediato se inició la construcción de la -- pista 05D-23I que fué la principal con 800 m. de longitud y la 10-28 con una longitud de 1600 m. para vientos cruzados, suficientes para el tipo de aeronaves que operaban, -- razón por la cual sus pavimentos eran de tierra, únicamen- te conformados.

El área que fué autorizada para la cons- trucción del nuevo Aeropuerto, corresponde a la zona lacustre del antiguo Lago de Texcoco cuyo subsuelo está formado por una capa de limos de más de 2 m. de espesor, apo yada sobre un estrato de arcilla de gran plasticidad, alta compresibilidad y elevado contenido de humedad.

En un sitio de tales características, el tipo de pavimento adecuado fué el empleo de la Base Tel-- ford consistente en la utilización de un material llamado

Telloloc, de piedras de diferentes tamaños de origen calizo colocadas y compactadas a mano usando posteriormente aplanadoras de aquella época. El procedimiento para construir la carpeta final era el mismo el que en la construcción de caminos se le daba el nombre de Macadam, y que consistía en colocar piedra triturada de unas dos y media pulgadas tamaño máximo en capas no mayores de 10 cm. para compactar con aplanadoras de rodillos. Una vez firme el material pétreo se aplicaba un riego de asfalto y en seguida se tendía otra capa de piedra triturada pero de menores dimensiones. Nuevamente se hacía la compactación y el riego asfáltico era un material de liga que adhería entre sí las dos capas de material pétreo. Se repetía la operación otra vez pero con material pétreo más fino y se aplicaba otro riego asfáltico, en cantidad y viscosidad adecuada para unir las dos últimas capas. Para terminar, se aplicaba un tercer riego asfáltico y sobre éste se tendía un material todavía más fino que ya era arena cribada; con esto se habían ya rellenado todos los intersticios del material pétreo, y sobre la arena se compactaba una vez más con aplanadora, dando todas las pasadas que fueran necesarias para obtener ya una superficie pulida que constituía la superficie de rodamiento de los aviones. Cualquier irregularidad se corregía como un simple bache superficial, aplicando arena y asfalto con regaderas de mano.

Para los años treinta, gradualmente se fué adquiriendo equipo de vuelo de mayor capacidad y peso. Por esta razón, fué prolongada la pista 05I-23D, hasta alcanzar una longitud de 1,500 m. empleando el mismo tipo de pavimento antes descrito, pero con un espesor total de 50 cm.

En la siguiente década, en sus primeros -- años, y obedeciendo a un Plano Regulador proyectado por - el Ing. Guillermo Villasana y autorizado por el General - P.A. Alberto Salinas Carranza, Jefe del Departamento de Aeronáutica Civil SCOP; se construyeron la pista 05D-23I con 1,600 m. de longitud; la pista 14-32 con 1,700 m. y en 1954 la 13-31, empleando en las dos primeras la base Telford y en la última mencionada solo grava cementada con - un espesor de 60 cm.

A mediados de ésta década de los cuarenta y siguiendo el plano regulador, se prolonga la pista --- 05I-23D hasta 2,700 m. y la 05D-23I hasta el Km 3+000. En la pavimentación de las prolongaciones antes citadas, se desechó la base Telford y se empleó grava cementada con - espesores entre 60 y 70 cm. incluyendo 10 cm. de carpeta asfáltica. Esta medida se tomó porque ya operaba en Mé- xico el DC-4 así como los Strato-Cliper con capacidad pa- ra 33 pasajeros y un peso de 22,500 Kg.

Al mismo tiempo se construyó el drenaje - de las pistas, que consistió en zanjas a cielo abierto a los lados y a 10 ó 15 m. del hombro de las mismas fué colo- cado un dren Francés en toda la longitud de éstas, también se construyó un colector principal que corría de poniente a oriente, de solo 60 cm. de diámetro.

En estas condiciones de pavimentación es- tuvo operando el Aeropuerto hasta finales de ésta década, para el año de 1950 ya se había reforzado el espesor de - la pista 05D-23I, colocando entre 20 y 30 cm. de grava ce- mentada y 10 cm. de carpeta asfáltica, que a su vez, en -- el tramo correspondiente se apoyaba sobre la base Telford -

este refuerzo de espesores, daba capacidad de soporte al pavimento para la operación del DC-6, que ya se iniciaba.

Con estos espesores, de aproximadamente - 75 cm. estuvo operando la pista 05D-23I, durante la década de los cincuenta en que nuevamente se prolonga hasta el - Km 3+300.

La frecuencia de tráfico y la llegada del avión Bristol-Britania con capacidad para 92 pasajeros, ocasionaron deformaciones en la sección estructural del pavimento y deterioros en la superficie de rodamiento,-- que hacían necesario cerrar la pista a la operación por varios días para realizar trabajos de reparación por medio de bacheos.

Al llegar el año de 1960 se inicia la era del Jet en México, pues la Compañía Mexicana de Aviación adquirió los aviones de Havilland Comet 4-C y la Compañía Aeronaves de México obtuvo el avión DC-8. Al mismo tiempo, la Secretaría de Obras Públicas encargada de mantener y conservar las instalaciones del Aeropuerto, preocupada por el estado que guardaban los pavimentos de las pistas que no eran capaces de soportar eficientemente las cargas que les imponían los nuevos aviones, encontró el diseño de pavimento adecuado a las condiciones del subsuelo y a la carga de los nuevos aviones que como el DC-8, pesa -- 140 toneladas.

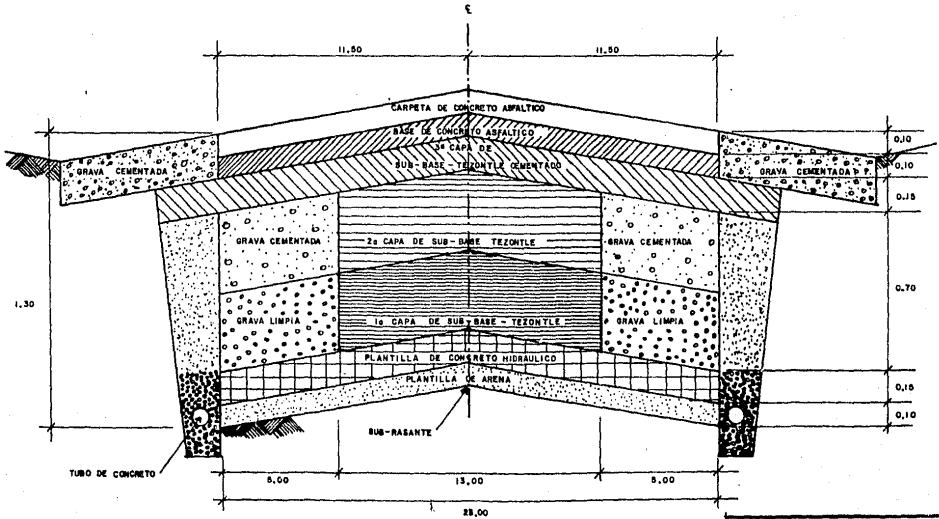
En forma experimental en el año de 1960,-- se empleó este tipo de pavimento denominado Sección Compen-

sada que consiste en sustituir el peso del material excavado al construir la terracería, con materiales de buena calidad y peso volumétrico ligero colocado convenientemente para lograr el efecto de balanceo. Sólo se empleó en la prolongación de la pista 05I-23D entre las estaciones 2+700 y 3+100 y en la prolongación de la calle de rodaje "A".

La estructura del tipo de pavimento descrito en el párrafo anterior, se muestra en la figura 2.3 para el caso de la calle de rodaje y se detalla a continuación:

Terminada la excavación efectuada con sumo cuidado para evitar perturbaciones en el suelo al nivel de la subrasante, se colocó sobre ésta una plantilla de arena de 10 cm. de espesor para evitar que la terracería fuese afectada por intemperismo y a la vez facilitar su drenaje al subir en la temporada de lluvias el nivel de aguas freáticas. A continuación se construyó la plantilla de concreto hidráulico con resistencia a la compresión simple de 125 Kg/cm^2 , y sobre ésta se colocaron en los 13 m. centrales y en dos capas, 70 cm. de tezontle con peso volumétrico máximo de 800 Kg/m^3 . Cada una de éstas capas fué compactada por vibración con un rodillo liso vibratorio de seis toneladas, aplicando seis pasadas en cada faja. En las fajas laterales de 5 m. cada una, se colocaron 35 cm. de grava limpia de 76.2 mm. a 6.35 mm. confinada con el procedimiento antes descrito. Sobre esta capa y para completar los 70 cm. puestos en la faja central, se construyeron 35 cm. de grava cementada compactada al 95%. Ya construidos los 23 m. de anchura de que consiste la calle de rodaje se colocó una capa de confina-

SÉCCION COMPENSADA PARA UNA CALLE DE RODAJE



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM

TESIS PROFESIONAL

JOSE OSCAR ALONSO

ORTIZ

MAYO 1988

FIGURA

2.3

miento de 15 cm. de espesor de tezontle cementado y compactado al 95%, empleando equipo de compactación con peso de 40 toneladas.

Finalmente se procedió a construir la base de 10 cm. de concreto asfáltico, de tamaño máximo de agregado de 38.1 mm. a 0.074 mm. elaborado en planta, -- sobre la cual se colocó la carpeta asfáltica de 10 cm. de espesor y material de tamaño máximo de agregado de 19.1 milímetros. Los acotamientos fueron construídos de grava cementada, de 10 cm. de anchura y 20 cm. de espesor con dos riegos asfálticos superficiales.

La competencia entre las empresas de aviación las obligó a proveerse de aviones de propulsión a -- chorro de gran envergadura, y así se encontraban operando en el Aeropuerto los DC-8, B-707 y otros similares; no-- obstante los pavimentos no se habían mejorado, por lo que se aceleró su destrucción presentándose deterioros en las carpetas asfálticas y hundimientos diferenciales que ponían en peligro a la estructura y a la operación de dichas aeronaves.

En el año de 1963 se reforzó con 30 cm. - compactos de mezcla asfáltica el pavimento en toda la extensión de la pista 05D-23I. Para ejecutar el refuerzo de espesores fué necesario cerrar la pista a la operación para someterla a un intenso bacheo, así como limpiar la - superficie de ella de polvo e impurezas, dándole posteriormente un picado previo y un riego de liga para permitir la subsecuente colocación de la base negra, para lo cual fueron colocados sobre el eje de la pista 25 cm. de mez-

cla asfáltica elaborada en planta estacionaria, empleando por su bajo peso volumétrico, tezontle negro. El bajo peso volumétrico de este material, se debe a su textura que presenta cavernas y por tanto, un alto grado de absorción; razón por la cuál su contenido óptimo de asfalto fué de 9.5% en peso.

El aspecto que presentó esta mezcla asfáltica fué alarmante, pues se advirtió un gran exceso de asfalto; sin embargo, los resultados fueron satisfactorios y además debido a su granulometría, la superficie terminada quedó con una textura bastante abierta, lo cual permitió colocar sobre ella la carpeta sin necesidad de haberle dado el picado de amarre previo a su tendido.

La colocación de los 25 cm. de asfalto fue realizada sobre el eje de la pista desvaneciéndolo hacia las orillas de ésta para poder darle el efecto de bombeo con una pendiente media de 1.25% necesario para la evacuación del agua superficial.

Después de colocar en el eje de la pista los 25 cm. de base negra, se aplicó un riego de liga con no más de 0.5 lt/m^2 , empleando asfalto rebajado del tipo FR-3.

Posteriormente, sobre la base negra se colocó la carpeta asfáltica de 5 cm. de espesor, empleando agregado pétreo del tipo basáltico con un tamaño máximo de 19.1 mm. y cemento asfáltico del No 6, a razón aproximada de 6.5% de material pétreo seco y suelto.

El procedimiento antes descrito fue un paliativo, pero no la solución al problema de las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. En efecto, ahora los aviones operaban sobre una superficie libre de deterioros y desprendimientos, pero las cargas que implicaban los fuertes espesores de carpeta asfáltica empleados en su renivelación y las que representaban la frecuencia del tráfico, ocasionaron deformaciones y hundimientos diferenciales tanto en el sentido longitudinal como en el transversal.

Mediante seccionamientos topográficos practicados periódicamente, se concluyó que en el año de 1967, nuevamente se procediera a renivelar la pista 05D-23I. Al realizarse dicha renivelación se colocó en el eje de la pista un espesor total de 25 cm. de mezcla asfáltica, desvaneciéndose hacia las orillas para dar el efecto de bombeo que se mencionó anteriormente y aplicándose los mismos procedimientos que en la ocasión anterior.

Esta práctica se llevó a cabo en toda la extensión de la pista en los años de 1971 y 1975 y parcialmente en los años de 1977 y 1979, colocando en cada ocasión espesores máximos de 25 cm. en el eje de ella para poder restituir el bombeo transversal con una pendiente mínima de 1.00% que señalan las especificaciones de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), para un Aeropuerto de la categoría del de la Ciudad de México.

Un aspecto muy importante que debe tomarse en cuenta en un Aeropuerto es el drenaje, que debe ser adecuado para evitar que los elementos que lo constituyen

afecten fundamentalmente la estructura de las pistas. Al respecto y tomando la idea del Ing. Francisco Gaytán Rufz Residente del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de -- México, se puede afirmar que un buen pavimento se consigue si tenemos "Un techo impermeable y un sótano seco".

Como en el caso de los pavimentos, tam--- bién la red de drenaje del Aeropuerto se ha visto afectada por la deformación del subsuelo, pues las pendientes - se han invertido y en este sentido las líneas afectadas - solo funcionan cuando el gradiente hidráulico puede vencer la contrapendiente. Practicando nivelaciones en los -- lechos de los colectores, han sido encontrados los tramos afectados y partiendo de éstos, se han construido líneas de alivio para llevar el agua a los colectores que sí funcionan.

Debido a que la limpieza y desazolve de - las tuberías de drenaje se practica sistemáticamente du-- rante todo el año, al hacerse en el colector que cruza de bajo de la pista en el cadenamiento 0+560 durante la reni-- velación en el año de 1971, se encontró que éste estaba - deformado sufriendo un hundimiento de 1.50 m. aproximada-- mente, en su parte correspondiente al eje de la pista. A-- provechando que la renivelación sería efectuada, se proce-- dió a cambiar el colector deformado por un tubo abovedado del tipo ARMCO.

Al practicar las excavaciones para susti-- tuir el tubo, se encontró que debido a la alta compresi-- bilidad del terreno y las importantes cargas que represen-- tan los espesores del pavimento y el tráfico, el terreno

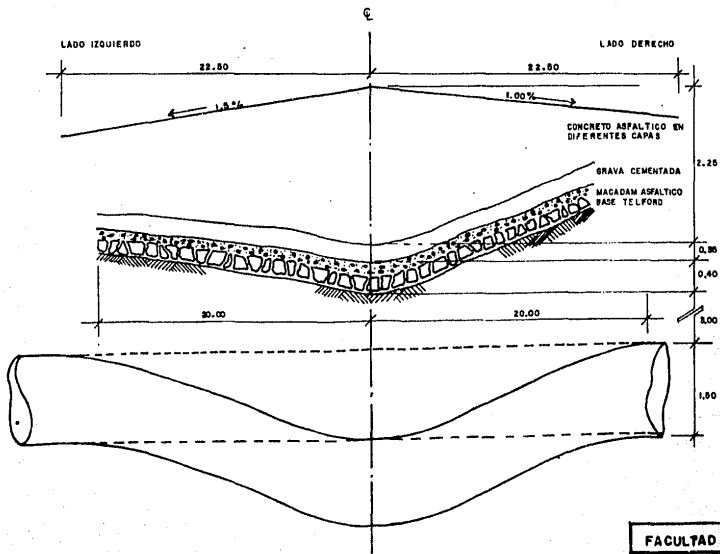
se había consolidado formándose simétricamente deformaciones en todas las capas de pavimento que sobre él se habían colocado y también en el propio tubo de lámina como se muestra en la figura 2.4 lo cuál da una idea de los fuertes problemas que originan las grandes cargas a que está sometido el subsuelo poco resistente del Aeropuerto.

El hundimiento en el eje de la pista fué de aproximadamente 150 cm., siendo menor en los hombros -- de ella. Además se observó que en el hombro izquierdo - de la pista, el hundimiento fué mayor y por esta razón al proyectar las renivelaciones con mezcla asfáltica, las --- pendientes transversales se construyeron con 1.5% a la -- izquierda y 1% a la derecha, con el propósito de reducirlos espesores a colocar y así demorar el hundimiento en su lado izquierdo.

El drenaje superficial de las pistas, se controla mediante cunetas que corren paralelas a ellas, - las cuales descargan en los colectores que a su vez llegan a los cárcamos de bombeo para enviarlas al Lago de Texcoco.

Con la finalidad de disminuir el aumento del peso volumétrico de los materiales que constituyen -- la cimentación del pavimento, es recomendable que cuando éstos estén cerca de un manto acuífero como es el caso del Aeropuerto, se coloquen subdrenes de zanja en la profundidad adecuada para impedir que el agua invada la estructura del pavimento. De ésta manera se obtiene el sótano - seco. El techo impermeable se obtiene construyendo una carpeta asfáltica debidamente dosificada para evitar su - permeabilidad.

PISTA 05 D-231, SECCION TRANSVERSAL EN ESTACION 0+560 TOMADA EN 1971



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO	
DNT12	
MAYO 1988	FIGURA 2.4

Capítulo aparte representan las grietas -- que se producen en el terreno natural, denominadas grietas de tensión cuyos efectos son muy nocivos para las -- construcciones asentadas sobre terrenos arcillosos planos de gran extensión y profundidad, expuestos a fuerte evaporación superficial durante las estaciones cálidas y a --- inundación con láminas pequeñas, durante los períodos de lluvias que son donde éstas se presentan. Pueden llegar a tener anchos del orden de varios metros, desarrollándose en centenares de éstos.

Estas grietas se presentan en zonas determinadas de la pista 05D-23I lo que ha originado agrieta-- mientos en su superficie de rodamiento. Para evitar esto se han empleado algunas prácticas como la de abrir una zanja, una vez localizada la grieta y hasta una profundidad que permita encontrar el nivel freático, rellenándola a continuación aprovechando el material extraído compactándolo a un grado semejante al del terreno natural.

Estudiado el problema por el Ing. Luis --- Aguirre Menchaca en el año de 1971, fue recomendado colocar una malla metálica sobre la rasante, y sobre ella poner el espesor de carpeta asfáltica proyectado en la renivelación que se realizó en dicho año. De esta manera se construía un concreto asfáltico armado con malla metálica que debería absorber las tensiones que provocan las grietas en la superficie de rodamiento. Sin embargo, dos años después aparecieron las mismas grietas que a partir de entonces han sido calafateadas según se van ampliando.

En el año de 1975, nuevamente se reniveló la

pista 05D-23I, colocando un espesor de 20 cm. de concreto asfáltico sobre el área de grietas que se localizaba aproximadamente entre el Km 1+700 y el Km 1+900 de ésta. Después de esta nueva renivelación, las grietas solo se insinuaron, pero con el tiempo estas se ampliaron nuevamente, obligando a seguir el antiguo procedimiento de calafateado.

La causa de la ineficacia de la malla metálica es el grado de intemperismo al que estuvo sujeta bajo la carpeta ya que se fue degradando, debido a la humedad presente en los estratos en que fué colocada así como a la presencia de sustancias erosivas en los mismos. Como se explicará más adelante, esto se ha tratado de corregir mediante el empleo de una malla plástica conocida como Geored.

Hasta aquí, la recopilación de las experiencias que se recuerda se han presentado en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México el que se considera ser un amplio campo de experimentación para los estudios de Mécanica de Suelos.

C A P I T U L O I I I

COMPORTAMIENTO DE LA PISTA 05D - 231

En los dos capítulos anteriores se ha ---
puesto de manifiesto el problema que plantean las deforma
ciones presentes en los pavimentos del Aeropuerto Internana
cional de la Ciudad de México cuya magnitud y geometría -
afectan severamente las condiciones de operación en ellas
ameritando en consecuencia frecuentes, costosos y moles--
tos trabajos de rehabilitación que interfieren además con
la operación aeroportuaria.

El problema de las deformaciones que sufre -
la sección estructural de las pistas del Aeropuerto Interna
cional ha sido estudiado en diferentes años y por un --
gran número de profesionales con el objeto de conocer me--
jor el problema y así proponer las soluciones correspon--
dientes. Para los fines que se persiguen en este trabajo
y basado en los resultados obtenidos por el Dr. Leonardo
Zeevaert en el año de 1977 y por la Cía. Geosol S.A. en el
año de 1984, en este capítulo se estudiará el comportamiento
de la pista 05D-23I con lo cual se tendrá una idea más -
clara del problema que afecta a las pistas. Los resultados
de este estudio proporcionarán los elementos necesarios
para proponer soluciones y analizar aquellas que ya se han
empleado en el pasado y que fueron mencionados en el capítulo
anterior.

A.- OBSERVACIONES DE CAMPO

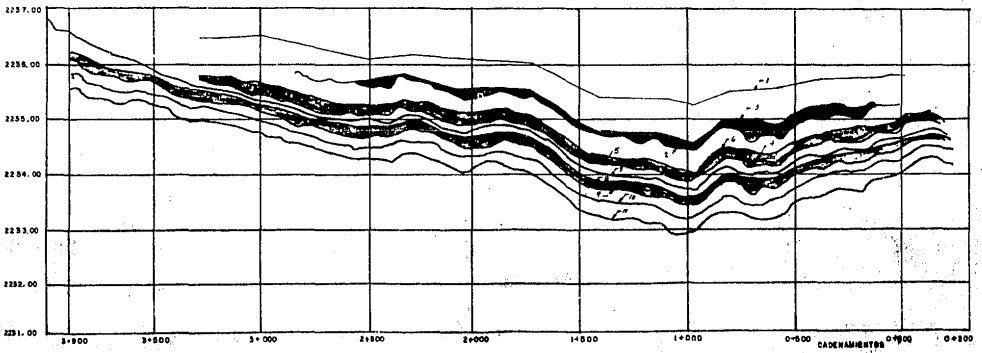
A.1.- ESTUDIOS TOPOGRAFICOS

Para llevar a cabo un análisis del problema existente en las pistas del Aeropuerto, ha sido necesario recabar información suficiente, no solo a través de una exploración y muestreo del subsuelo para analizar sus características, sino también, ha sido de gran importancia el llevar a cabo una inspección visual del problema. Para ello, y auxiliados por la topografía de precisión,-- se han efectuado en diferentes años, levantamientos topográficos que muestran el comportamiento de la pista en cuanto a su desplazamiento vertical se refiere.

De la observación e interpretación de la información derivada de los estudios descritos, se nota una tendencia generalizada de la pista a hundirse con respecto al terreno circundante, también se presentan hundimientos diferenciales entre secciones debido en parte a la heterogeneidad del peso de la pista y a la variación de las propiedades de compresibilidad del subsuelo.

Estos hundimientos totales y diferenciales del eje de la pista se pueden observar en la figura 3.1 que fué obtenida del plano "Perfil de Pavimentos de la Pista 05D-23I", elaborado por la oficina de estudios especiales de la Dirección de Aeropuertos de la extinta SAHOP en el mes de Junio de 1977.

ELEVACIONES



N O M E N C L A T U R A :

- 1.- Rasante en 1963
- 2.- Rasante en Diciembre de 1967
- 3.- Reencarpetao en Enero de 1968
- 4.- Rasante en Agosto de 1970
- 5.- Rasante en Marzo de 1971
- 6.- Reencarpetao en Abril-Agosto de 1971
- 7.- Rasante en Diciembre de 1972
- 8.- Rasante Mayo de 1974
- 9.- Reencarpetao en Diciembre 1974 - Mayo 1975
- 10.- Rasante en Febrero de 1976
- 11.- Rasante en Abril de 1977

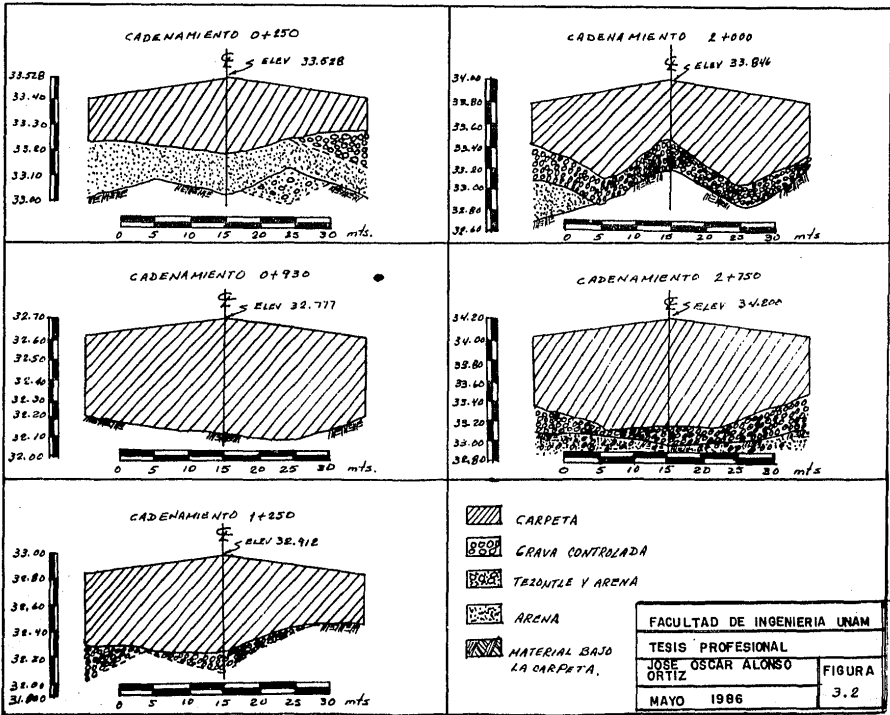
PERFIL DE LOS PAVIMENTOS DE LA PISTA 05 D-23 I
AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CD. DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO	FIGURA
ORTIZ	5.1
MAYO, 1986	

En dicha figura se presentan varias nivelaciones de la pista desde 1963 hasta Abril de 1977 referidas a un banco fijo de nivelación localizado en el cerrero del Peñon, por lo que los hundimientos reportados en la figura registran el propio de la pista mas el hundimiento regional. En esa misma figura, se observa que la pista, en ese mismo periodo de tiempo ha sido renivelada y reforzada con un espesor medio estimado de 20 cm. de concreto asfáltico en cada una de las siguientes fechas: Enero de 1968, Agosto de 1971 y Abril de 1975.

A.2.- CARACTERISTICAS DE LA SECCION ESTRUCTURAL DE LA PISTA

Con el objeto de conocer los espesores y el tipo de material que constituye la sección estructural de la pista, en el año de 1977 se efectuaron series de sondeos para obtener muestras inalteradas de ésta en diferentes secciones. En la figura 3.2 se presentan en forma gráfica los espesores obtenidos en cada una de las secciones investigadas. Con las muestras obtenidas se efectuó también una investigación de pesos volumétricos habiendo obtenido para éste un valor medio de 2.166 Ton/m^3 .



A. 3.- CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO DE LA PISTA.

Con la finalidad de observar las condiciones presentes en la superficie de rodamiento de la pista y el terreno circundante a ella, es práctica común en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México efectuar una visita de inspección semanal a cada una de las pistas. La realización de éstas observaciones es encomendada en ocasiones a personal especializado para que aquellas sean más completas. Así, en 1977 como parte de las investigaciones efectuadas sobre el comportamiento de la pista se llevó a cabo una exhaustiva inspección visual del estado superficial que guardaba y cuyos resultados se presentan a continuación.

Cabe señalar que a pesar del tiempo que ha transcurrido desde las últimas inspecciones efectuadas dichas observaciones siguen teniendo vigencia ya que generalmente después de 1 a 2 años de reparadas, las fallas vuelven a aparecer en los mismos lugares.

En términos generales, se puede decir que el estado de la superficie de rodamiento es satisfactorio o al menos se trata de que así sea ya que lo que se busca es la seguridad en las operaciones aeronáuticas, sin embargo, existen zonas muy localizadas donde se observan defectos que van desde pequeñas fisuras capilares de contracción hasta grietas de importancia. Los defectos se pueden clasificar de la siguiente manera y su localización

se puede observar en la figura 3.3.

a) Agrietamientos regionales en el terreno producidos por desecación de la superficie de éste.

b) Grieta profunda en el terreno, normal a la pista. Su origen puede atribuirse al fenómeno de grietas de tensión.

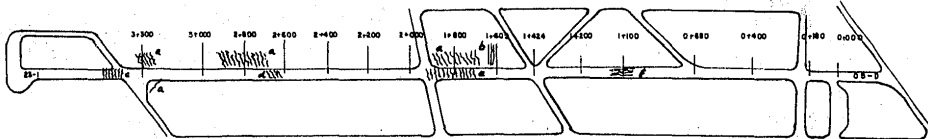
c) Grietas transversales en el pavimento de la zona de transición entre la pista y su ampliación.

d) Grietas diagonales en el pavimento producidas por la continuación de los agrietamientos regionales dentro de la pista.

e) Grietas trasnversales en la parte central del pavimento producidas por el frenaje del tren de aterrizaje de aviones pesados.

f) Fisuras superficiales de contracción en las juntas longitudinales de la carpeta.

Un aspecto aparte, representan las áreas de encharcamiento que se originan debido a las deformaciones que sufre la superficie de rodamiento. Estos encharcamientos en la zona de grietas y fisuras producen filtraciones importantes del agua que saturan la capa subrasante dando como resultado el reblandecimiento de las capas subyacentes que motiva el aumento de la compresibilidad del subsuelo.



N O M E N C L A T U R A

- a.- Agrietamientos racionales en el terreno producidos por desecación de la superficie del terreno.
- b.- Grieta profunda en el terreno, normal a la pista.
- c.- Grietas transversales en el pavimento de la zona de transición entre la pista y su ampliación.
- d.- Grietas diagonales en el pavimento producidas por la continuación de los agrietamientos racionales dentro de la pista.
- e.- Grietas transversales en la parte central del pavimento producidas por el frenado del tren de aterrizaje de aviones pesados.
- f.- Fisuras superficiales de contracción.

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSÉ OSCAR ALONSO ORTIZ	FIGURA
MAYO 1988	3.3

B. PROPIEDADES MECANICAS DEL SUBSUELO

Con el fin de conocer la estratigrafía y propiedades mecánicas de los materiales que constituyen el subsuelo a lo largo de la pista y, para con estos datos poder estimar la magnitud de los asentamientos que la afectan, ha sido necesario en diferentes ocasiones efectuar sondeos de muestreo inalterado.

En esta sección se presentarán los resultados de estudios efectuados en 1977 y en 1984 con la finalidad de observar los cambios que se han sucedido en las características del subsuelo a lo largo de 8 años aproximadamente y que nos llevarán a conclusiones de interés práctico.

En ambas ocasiones fueron efectuados sondeos de muestreo mediante el hincado a presión de tubos de pared delgada. En el año de 1977, el sondeo fue ubicado sobre una línea desplazada 150 m. del eje central longitudinal de la pista y a la altura del cadenamiento 0+930, hasta una profundidad de 59 m. y en el año de 1984 fue ubicado sobre dicha línea y también sobre el eje central de la pista, pero a la altura del cadenamiento 1+280 hasta una profundidad de 57 m. y 20 m. respectivamente.

En vista de que lo que se trató de obtener fue la distribución de los esfuerzos efectivos bajo la

pista para llevar a cabo un análisis de los asentamientos de ésta, los sondeos teóricamente debieron efectuarse bajo una sección de ella, sin embargo, debido a que la obtención de muestras requería de un tiempo prolongado y la pista no podía ser cerrada a la operación, fué que la ubicación de los sondeos profundos quedó fuera de ella.

Como se mencionó anteriormente, en el año de 1984, sí fue efectuado un sondeo bajo la pista hasta - 20 m. de profundidad lo que permitió reunir información suficiente sobre la influencia del peso del pavimento en la distribución de las presiones efectivas actuantes. Lo antes expuesto será discutido posteriormente.

B.1.- ESTRATIGRAFÍA

De los resultados obtenidos de los sondeos efectuados y siguiendo la terminología adoptada por la mayoría de los organismos que han venido estudiando las arcillas del Valle de México, podemos decir que el subsuelo en que se ubica el Aeropuerto, hasta una profundidad del orden de 60 m., está constituido por cuatro horizontes, es decir, los que corresponden al Manto Superficial, la Formación Arcillosa Superior, Primera capa dura y la Formación Arcillosa Inferior respectivamente. Dicho lo anterior, se presenta a continuación una breve descripción de cada uno de ellos.

MANTO SUPERFICIAL (MS).- Se trata de la capa superior constituida por arcillas y limos afectados por secado, cuyo espesor en los sondeos efectuados fluctúa entre 3.5 m. y 5 m. Se caracteriza por su contenido de agua relativamente bajo, generalmente menor que 100%, y por su consistencia firme; su resistencia al esfuerzo cortante es un tanto errática, en donde los valores no suelen ser menores que 5 Ton/m².

FORMACION ARCILLOSA SUPERIOR (FAS).- Está constituida por arcillas y limos arcillosos de diferentes coloraciones, de consistencia muy blanda a blanda, de alta compresibilidad, interestratificados con capas delgadas de arena y vidrio volcánico. El contenido de agua fluctúa por lo general entre 300 y 500%, con algunos casos de excepción, en donde llegan a ser mayores de 600%

El espesor de esta formación es aproximadamente de 31 m.

PRIMERA CAPA DURA (CD).- Está constituida por limos arenosos, cementados en grado variable, en donde la resistencia a la penetración estándar varía entre - 10 golpes hasta más de 50. Esta capa se localiza entre 36 y 38 m. aproximadamente.

FORMACION ARCILLOSA INFERIOR (FAI).- De características similares a la superior, se diferencia de ella principalmente porque su compresibilidad, aunque alta, es menor, siendo asimismo de menor espesor, ya que es de aproximadamente la mitad de la primera formación, es decir, de unos 16 m. El contenido medio natural de agua se ubica en el orden de 250%.

Es pertinente señalar que a esta última formación le subyacen los depósitos profundos, que dada su alta resistencia y baja compresibilidad no fueron explorados por carecer de importancia para los fines propuestos.

La estratigrafía obtenida del sondeo efectuado en 1984 así como los contenidos naturales de agua encontrados en dicho sondeo se reportan en la figura 3.4. De la observación de dicha figura se constata la descripción de la estratigrafía hecha anteriormente, referente a los altos contenidos de humedad presentes en los diferentes estratos así como también los bajos contenidos presentes en los lentes de arena y vidrio volcánico que se encuentran a diferentes profundidades. Se observan también en la gráfica, los valores del límite líquido

y el índice de plasticidad presentes a diferentes profundidades, pudiendo observar que los valores del límite líquido encontrados mayores que el 50% indican la alta compresibilidad del subsuelo.

Otro aspecto importante al observar el perfil estratigráfico, es la posición del nivel de aguas freáticas que se encontró en el período de tiempo en que se efectuó el sondeo a una profundidad de 318 mm, cabe señalar que según los registros que se tienen de observaciones efectuadas en años anteriores se ha encontrado que el nivel freático se presenta generalmente a una profundidad media de 2 m.

Estos niveles sin embargo, varían con la época estacional, encontrándose fluctuaciones con un intervalo de \pm 0.5 m., correspondiendo los niveles menores a la época previa a las lluvias y los mayores durante o ligeramente después de esta.

B.2.- RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La resistencia al esfuerzo cortante de los sedimentos de la arcilla lacustre del Aeropuerto, es muy variable con respecto a la profundidad; sus valores son del orden de 0.55 Kg/cm^2 para los sedimentos superficiales hasta 10 m. de profundidad aproximadamente, reduciéndose a valores del orden de 0.25 Kg/cm^2 a 0.30 Kg/cm^2 después de los 10 m. hasta el primer estrato resistente, para aumentar nuevamente a valores de 0.8 a 1.0 Kg/cm^2 para los sedimentos localizados entre el primero y el segundo manto resistente, lo que hace que estos sedimentos tengan mayor resistencia y menor compresibilidad.

B.3.- ESFUERZOS EN EL SUBSUELO

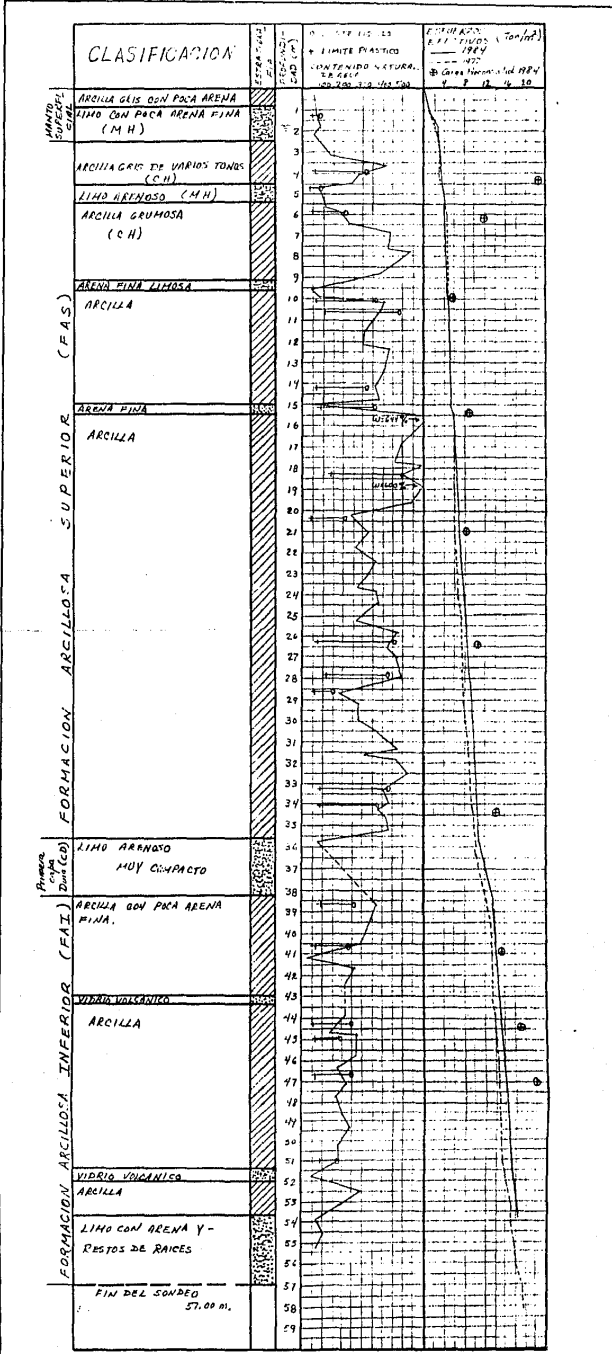
Con la información obtenida y descrita anteriormente, ha sido calculada la variación de los esfuerzos efectivos con la profundidad. En la figura 3.4 se observa el diagrama de esfuerzos efectivos obtenido en el año de 1977 con los resultados del sondeo realizado en el cadenamamiento 0+930 y el obtenido en 1984 en el sondeo efectuado en el cadenamamiento 1+280. Se presentan también sobre el mismo diagrama las cargas de preconsolidación encontradas para cada una de las muestras empleadas en las pruebas de consolidación efectuadas.

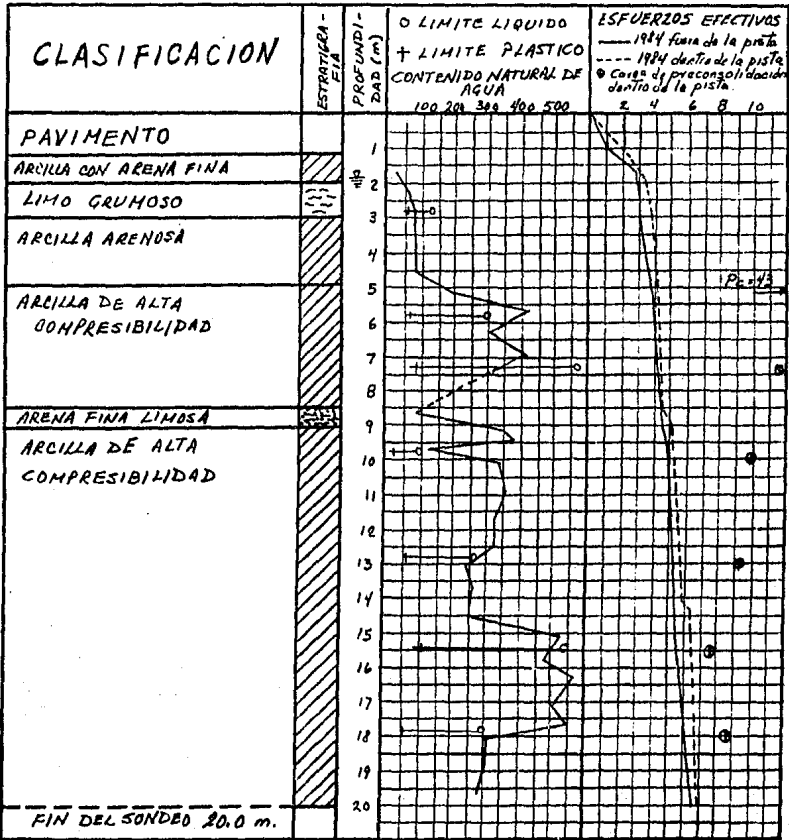
De la observación de ambos diagramas se nota un sensible paralelismo entre ellos hasta una profundidad aproximada de 15 m. a partir de la cual se manifiesta un incremento en los esfuerzos efectivos registrados en 1984 con respecto a los de 1977. Lo anterior significa que en los estratos inferiores la disipación de la presión de poro ha sido mayor que en los primeros estratos, lo cual da una idea del acelerado proceso de consolidación que experimentan dichos estratos. Esto también se constata al observar que en la mayoría de los casos los valores del esfuerzo efectivo actuante, se aproximan rápidamente al valor del esfuerzo crítico representado por la carga de preconsolidación, siendo ésta, la máxima carga a que ha estado sujeto el suelo a lo largo de su historia geológica y que marca el límite entre la rama de recompresión y la rama virgen en la curva de compresibilidad. Una vez superado este esfuerzo crítico la estructura del --

suelo cambia completamente pudiendo ocasionar la falla o bien la consolidación mayor de algún estrato en particular lo cuál aceleraría aún más el asentamiento de la pista.

Las observaciones anteriores serían totalmente válidas si los sondeos efectuados y la toma de muestras se hubieran efectuado en el mismo sitio en 1977 como en 1984, sin embargo, apoyándonos en el hecho de que se trata de una región de origen lacustre con una estratigrafía y propiedades mas o menos uniformes podemos efectuar una comparación aproximada como la realizada.

Como se trató anteriormente, los sondeos debieron haberse efectuado dentro de la pista ya que los esfuerzos reportados en la figura 3.4 no muestran la influencia de estos debido al peso propio de la sección estructural de la pista, sin embargo, en 1984 sí fué efectuado un sondeo, aunque solo hasta 20 m. de profundidad, pero que nos da una idea sobre dicha influencia. En la figura 3.5 se presentan ambos diagramas, donde se puede observar la tendencia del esfuerzo efectivo a aumentar por efecto del peso de la pista.





3.5

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	
MAYO 1986	FIGURA 3.5

C.- RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EFECTUADAS

En el año de 1977 y después de un tratamiento teórico efectuado por el Dr. Leonardo Zeevaert con base en los resultados del estudio efectuado en la pista 05D-231, fueron calculados los asentamientos de ésta bajo las siguientes condiciones: la primera, sobre la base de que la sobrecarga del reencarpetado de 20 cm. de espesor en promedio, se aplica cada tres años y medio y la segunda, que la sobrecarga se aplica en forma gradual durante el mismo período. Lo anterior, se hizo con el objeto de tener dos condiciones límite de hundimientos debiendo que dar intermedio el hundimiento teórico real.

Los resultados obtenidos para el eje de la pista se presentan gráficamente en la figura 3.6 La curva "A" representa la aplicación de carga instantánea cada tres años y medio y la envolvente a esta curva, representa la rapidez del hundimiento del eje de la pista respecto al terreno.

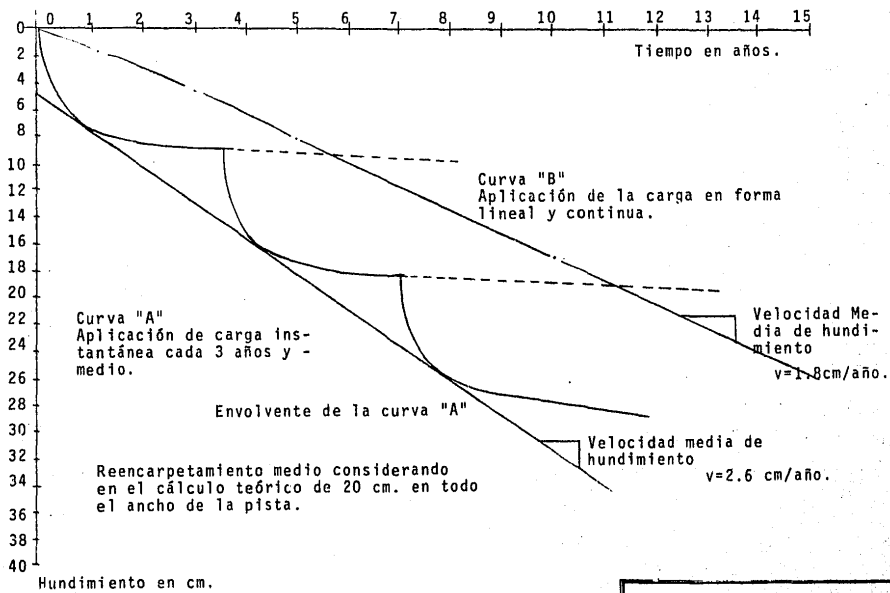
La curva "B" muestra el hundimiento producido por la misma carga que la empleada para la curva "A" pero aplicada en forma gradual y continua.

Como se observa, la velocidad teórica del hundimiento varía de acuerdo con la forma de aplicación de la carga y el hundimiento proseguirá si se continúa --

con la práctica de seguir sobrecargando la pista periódicamente con nuevas carpetas. Se observa además en la curva "A" que si se suspende la colocación de la sobrecarga en la pista el hundimiento tiende a estabilizarse con el tiempo reduciéndose en forma considerable su velocidad.

Con el objeto de conocer el hundimiento transversal teórico de la pista, también fueron calculados los desplazamientos verticales de 8 puntos de la misma, para un incremento de carga equivalente a la producida por un reencarpetao, encontrándose hundimientos diferenciales entre los bordes y el centro de la pista del orden de 2 cm. para el primer año después de aplicada la carga y del orden de 3 cm. para un tiempo de 10 años. Estos hundimientos diferenciales se presentan en la figura 3.7 mostrando el perfil de una sección transversal de pista con sus pendientes teóricas como lo marca la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), y los perfiles que por hundimientos se tendrán a 1, 2, 5 y 10 años después de aplicada la carga de reencarpetao.

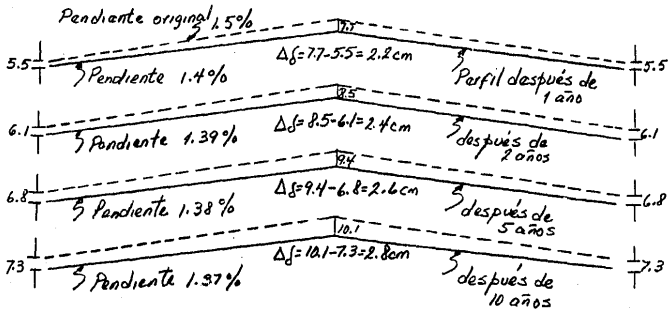
Es importante hacer notar que los resultados anteriores fueron obtenidos sobre la base de que la sobrecarga producida es uniforme, es decir, que la pista se reencarpeta con un espesor medio de 20 cm. en todo su ancho, lo que en la práctica no sucede, ya que necesariamente para restituir la pendiente el espesor de la nueva carpeta que se coloca al centro, es mayor que el de los bordes y en consecuencia los hundimientos diferenciales reales deben ser mayores que los presentados en la figura 3.7.



HUNDIMIENTOS TOTALES DEL EJE DE LA PISTA (ZEEVAERT, 1977)

FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	FIGURA 3.6
MAYO 1986	

HUNDIMIENTOS EN UNA SECCION TRANSVERSAL
DE LA PISTA POR UNA REENCARPETADA



NOTA.- AL VOLVER A REENCARPETARSE, EL HUNDIMIENTO DIFERENCIAL ENTRE EL CENTRO Y LOS EXTREMOS SE INCREMENTA CON LA TENDENCIA MOSTRADA.

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	FIGURA
MAYO 1986	3.7

C A P I T U L O I V

SOLUCION EMPLEADA EN LA REHABILITACION DE LA PISTA EN EL
AÑO DE 1984

A.- ALTERNATIVAS DE SOLUCION

De lo expuesto anteriormente, se justifica la necesidad de estudiar nuevas medidas de mantenimiento a las pistas procurando anular o disminuir al mínimo los incrementos de presión producidos por las continuas renivelaciones y que originan los correspondientes hundimientos. Al respecto se propone analizar las siguientes alternativas:

ALTERNATIVA 1

Consiste en reperfilear la sección transversal de la pista proyectando una rasante tal que permita restituir el bombeo recortando fundamentalmente las fajas de orilla y colocando un relleno en el área central de espesor mínimo. Dicho recorte debería efectuarse considerando un sobre-espesor para alojar una nueva carpeta, que aún relativamente delgada sería necesario colocar por razones de acabado. La descripción de esta solución se puede observar en la figura 4.1 .

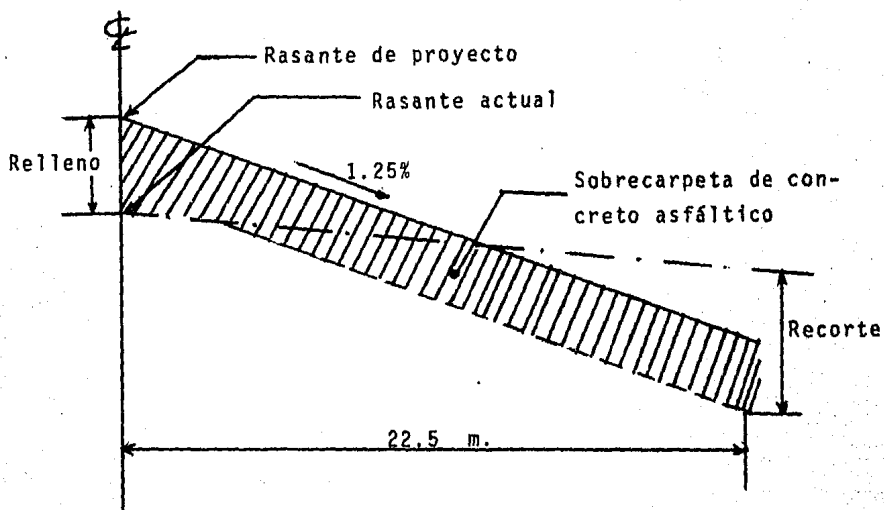


FIGURA 4.1

ALTERNATIVA 2

Consiste en reperfilear la sección sin efectuar un recorte previo, tal como ha sido realizado en todas las renivelaciones efectuadas a la pista colocando un espesor de concreto asfáltico al centro de ella y desvaneciéndolo hacia las orillas para darle a la pista el efecto de bombeo deseado como se muestra a continuación:

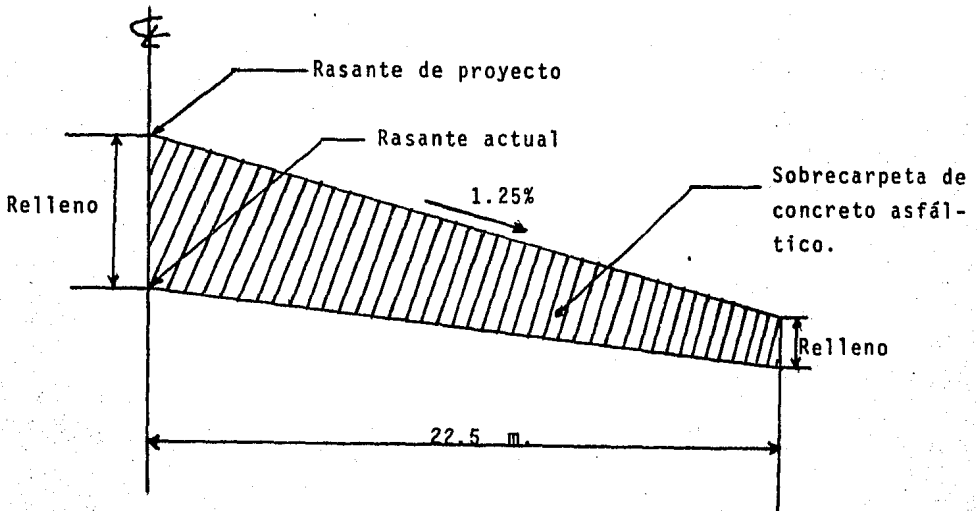


FIGURA 4.2

ALTERNATIVA 3

Corregir el bombeo con el criterio de elevar la rasante y compensar por sustitución de masas el peso del mismo relleno para lo cual habría necesidad de abrir -- una caja en la franja central, de 18 a 20 m. de ancho y con una profundidad aproximada de 70 cm. para restituir parcialmente el material removido por material ligero de manera tal que el peso de la nueva sección del pavimento sea prácticamente igual al del existente. Esta alternativa se presenta en la figura 4.3 .

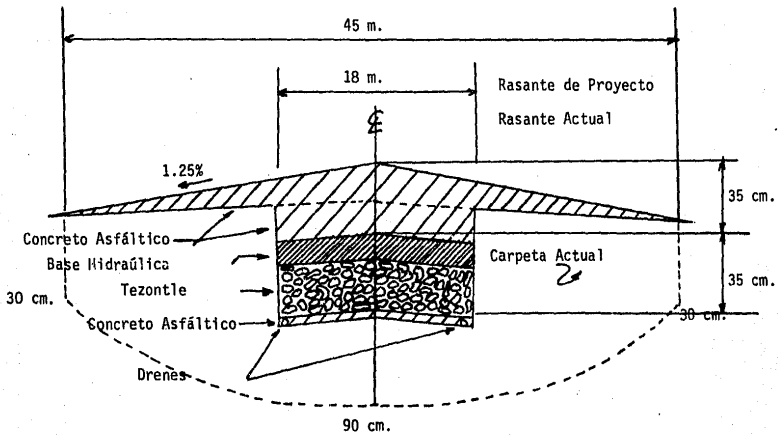


FIGURA 4.3

B.- ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS

En base a los resultados de los estudios efectuados sobre el comportamiento de la pista 05D-23I, en la presente sección serán estimados los asentamientos de la pista bajo las condiciones impuestas por las alternativas descritas.

El cálculo de los asentamientos será efectuado considerando las siguientes hipótesis:

a) Solo se consideraran los estratos correspondientes a la Formación Arcillosa Superior hasta una profundidad aproximada de 35 m. donde comienza la primera capa dura como se puede observar en la figura 3.4. Al respecto, es importante insistir en el hecho de que la información disponible sobre las condiciones geotécnicas del subsuelo bajo la pista solo se tiene hasta una profundidad de 20 m. (Figura 3.5), contando también con información hasta una profundidad de 57 m. (Figura 3.4) pero fuera de la influencia del peso de ella.

b) Por lo anterior, y considerando la importancia del efecto de la consolidación en los primeros 20 m. de profundidad producido por el peso de la pista, será empleada la información de que se dispone hasta la mencionada profundidad. Para el análisis de la con-

solidación de los 15 m. restantes, será extrapolada la información del sondeo ubicado fuera de la pista. La conjunción de ambos sondeos que serán empleados se presenta en la figura 4.4, donde también se presentan los estratos que serán tomados en cuenta para los cálculos así como los puntos donde se cuenta con información de la compresibilidad de ellos. Las curvas de compresibilidad obtenidas se presentan en las figuras 4.5 a 4.14 .

c) Para la estimación de los asentamientos será empleada la fórmula propuesta por Terzaghi que dice:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n m_{v_i} \int_0^H \Delta \bar{p}_i dz$$

donde:

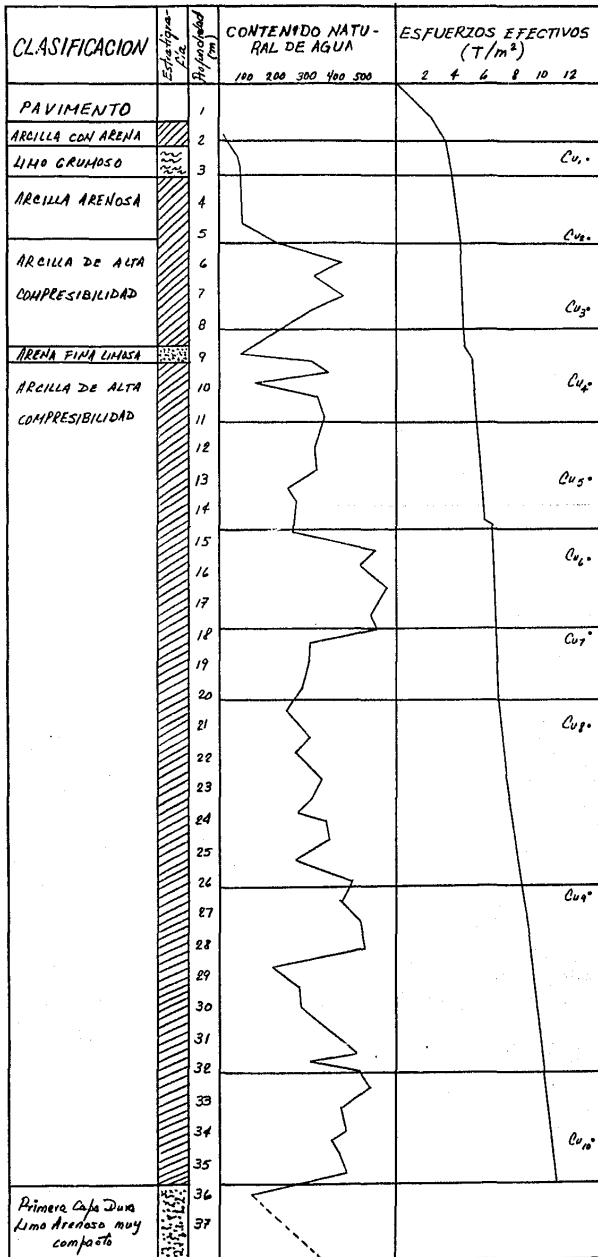
n = número de estratos

m_v = coeficiente de variación volumétrica

$\Delta \bar{p}$ = incremento del esfuerzo efectivo debido a la sobrecarga.

H = espesor del estrato en cm.

d) Como fué mencionado en capítulos anteriores, es sabido que existe un fuerte espesor de concreto asfáltico que se ha acumulado a lo largo de todas las renivelaciones efectuadas a la pista durante su historia. Para los fines del cálculo del esfuerzo vertical inducido por la sobrecarga impuesta, el efecto producido por dicho espesor no ha sido considerado en cuanto a la forma en que afectaría a la transmisión de la sobrecarga al subsuelo, es decir, la distribución --



4.4

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	
MAYO 1986	FIGURA 4.4

del esfuerzo vertical producido por la sobrecarga será calculado sobre la base de que ésta actúa en un medio - homogéneo, semiinfinito, isótropo y linealmente elástico.

e) En el cálculo de los esfuerzos --- verticales inducidos en la masa del suelo serán empleadas una serie de gráficas que proporcionan los valores de influencia correspondientes a una sobrecarga de longitud finita, a pesar de que la sobrecarga actuante en la pista debería considerarse como de longitud infinita sin embargo, después de haber calculado ésta con gráficas elaboradas para la condición anterior, se observó - que se obtienen valores de influencia muy parecidos por lo que se decidió emplear las primeras en vista de que es más sencilla su aplicación.

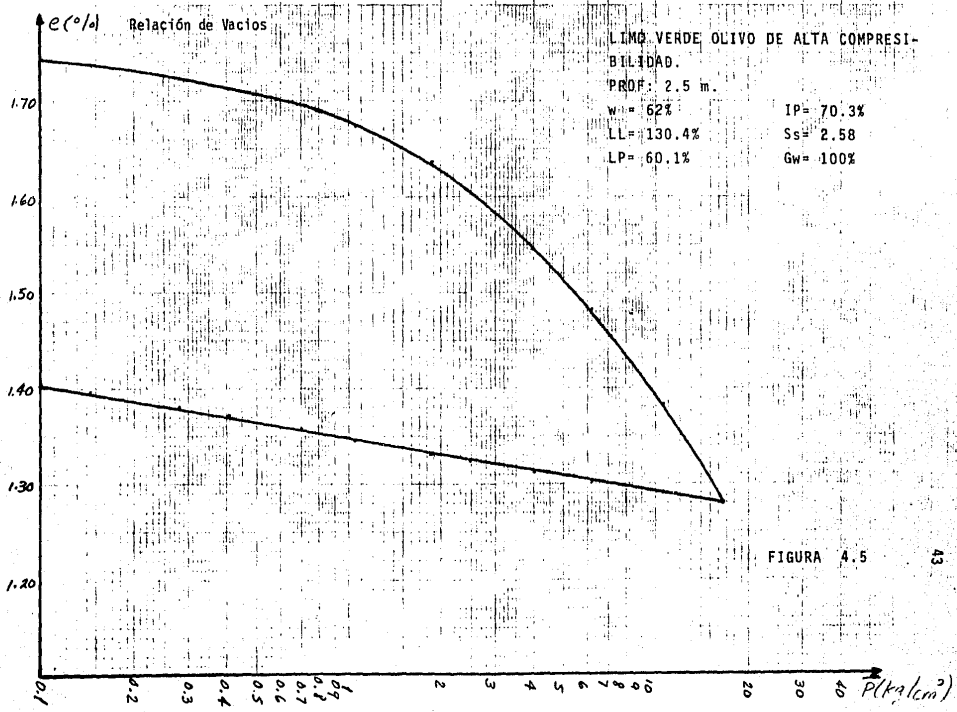
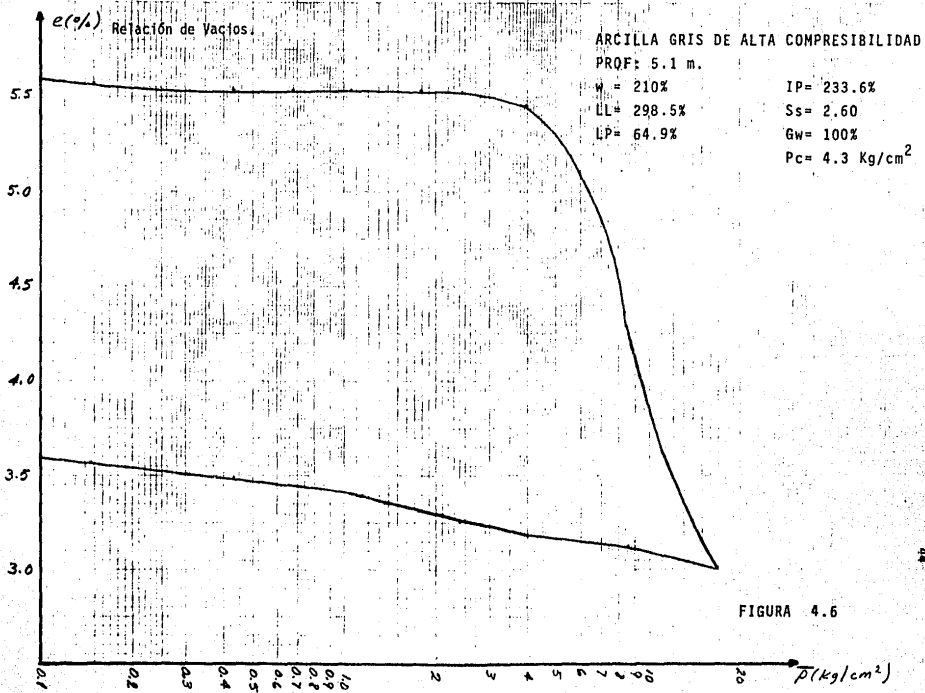
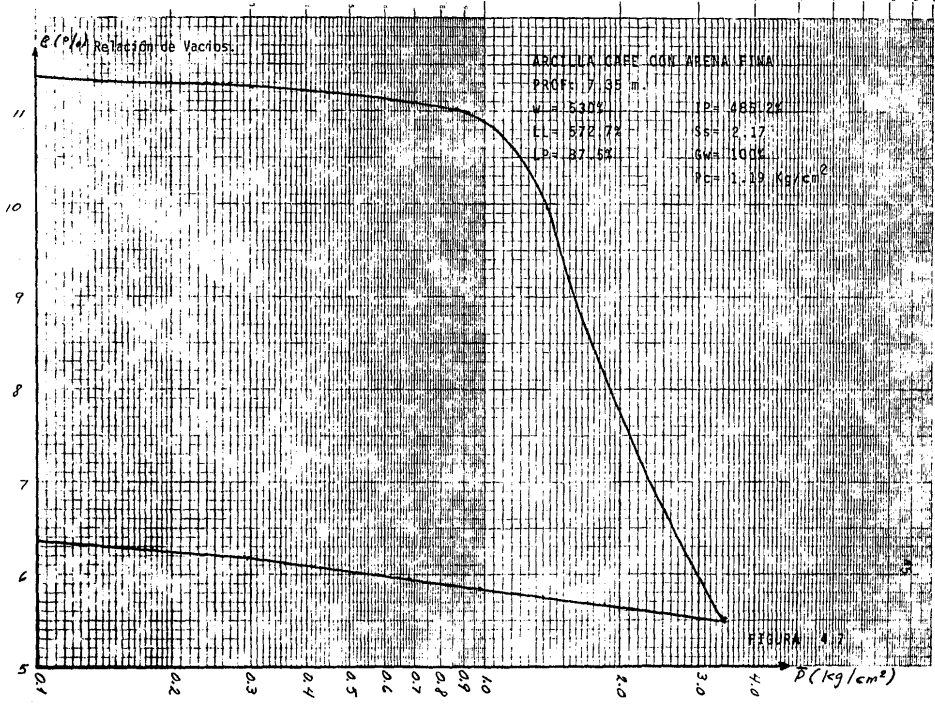
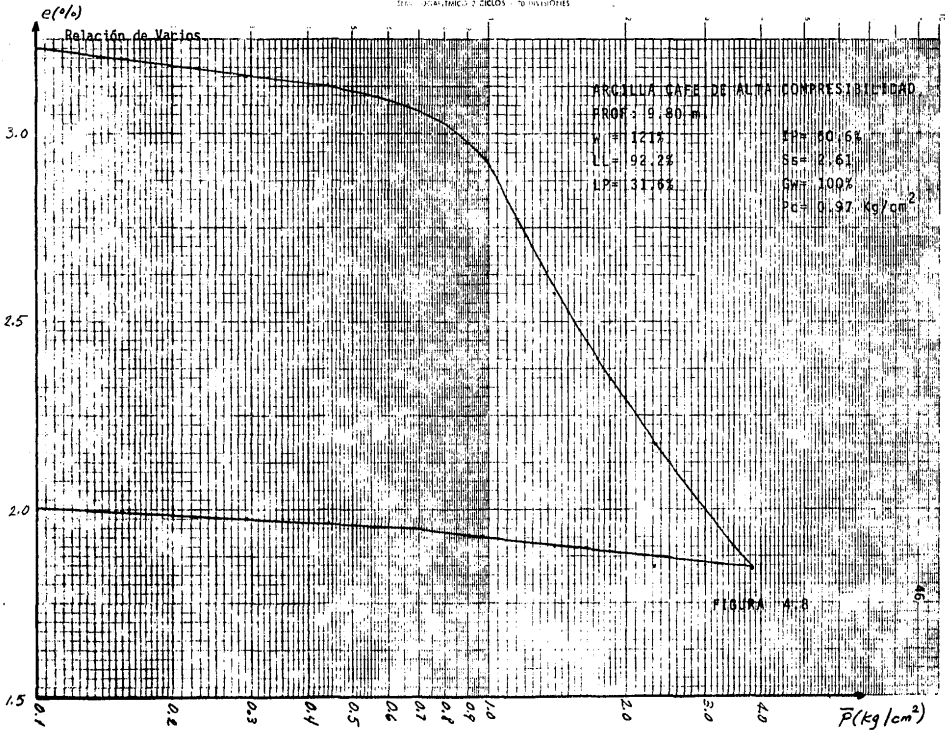
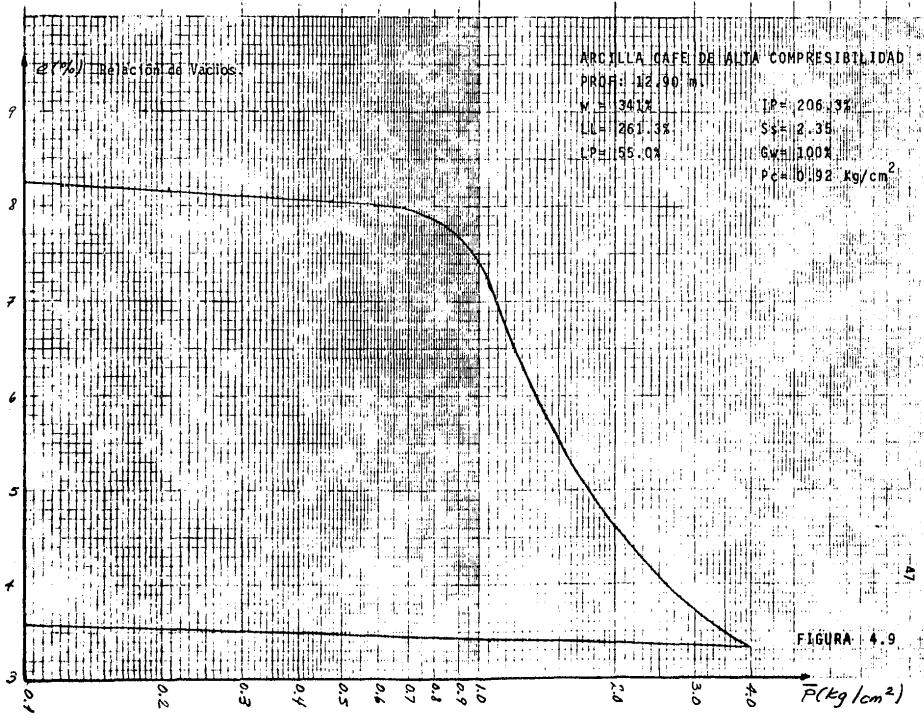


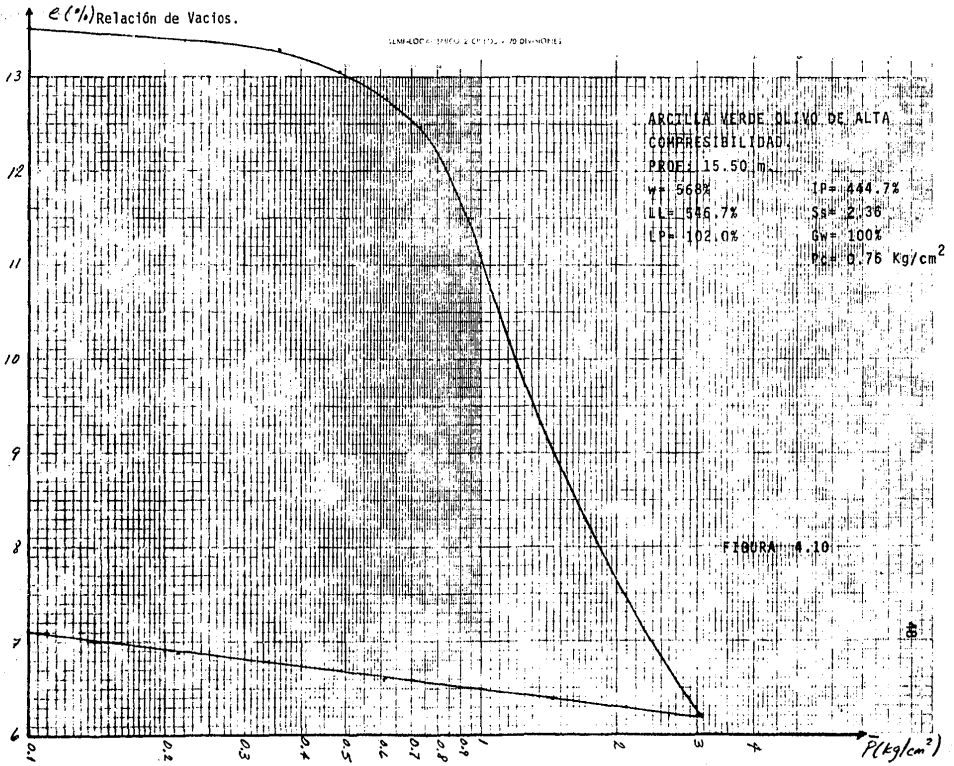
FIGURA 4.5

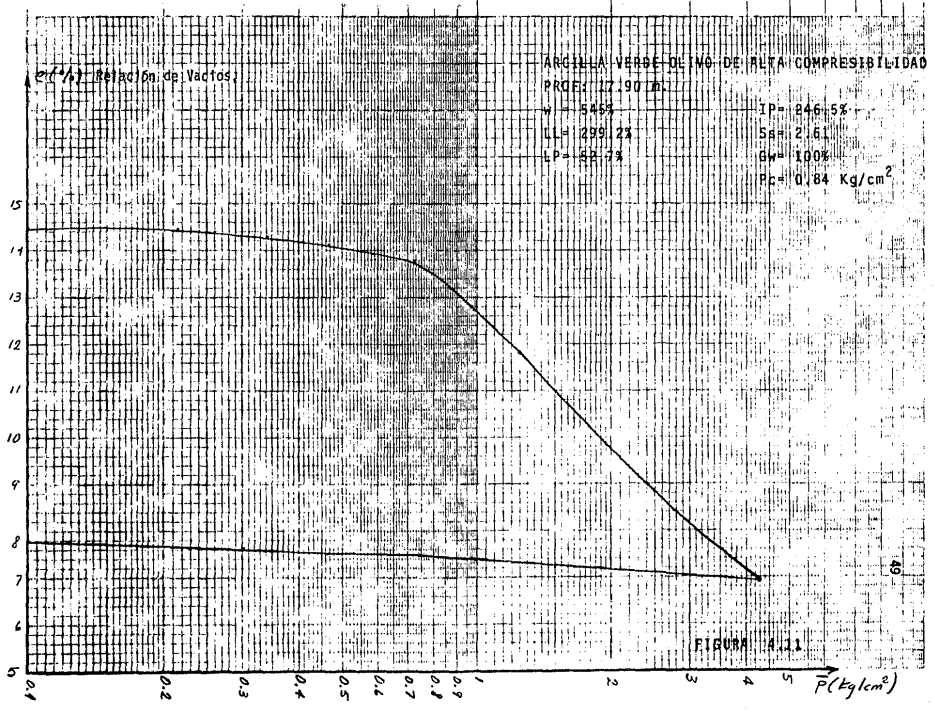


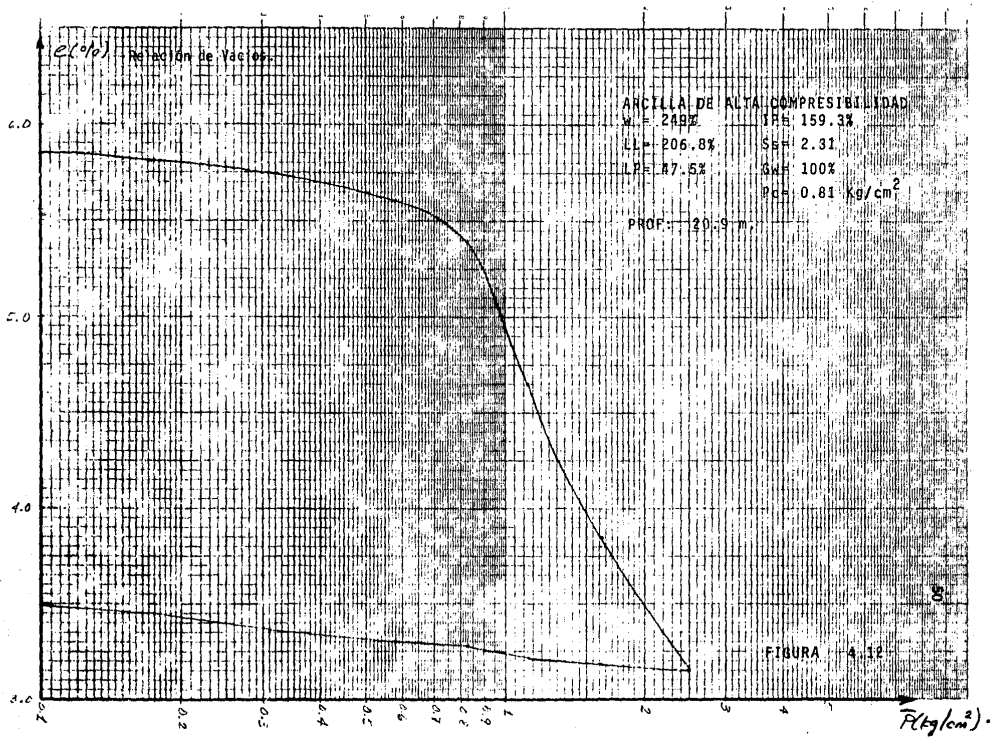


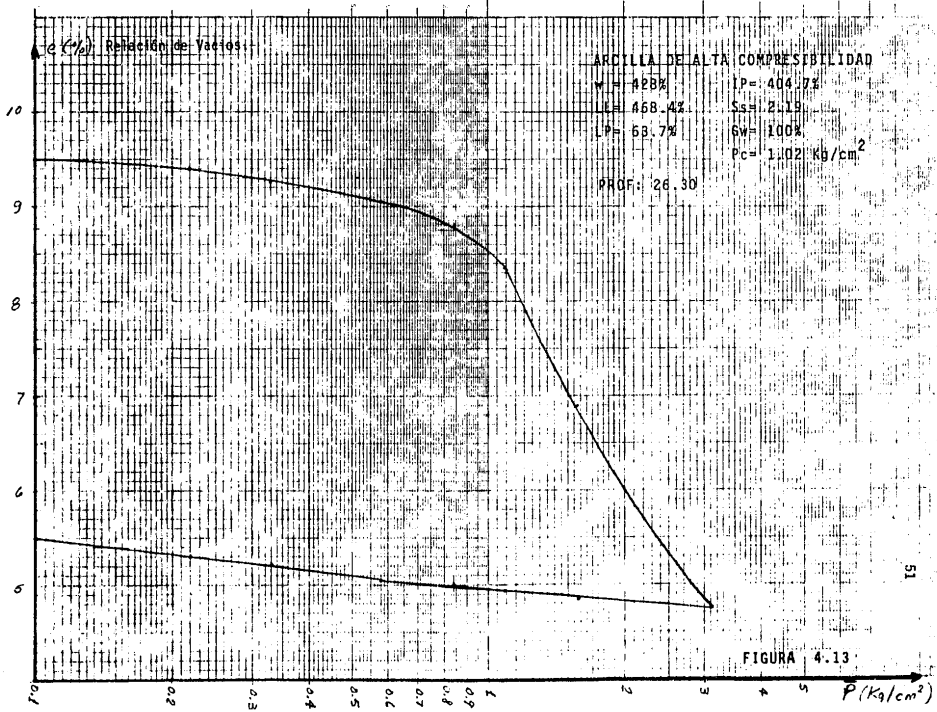


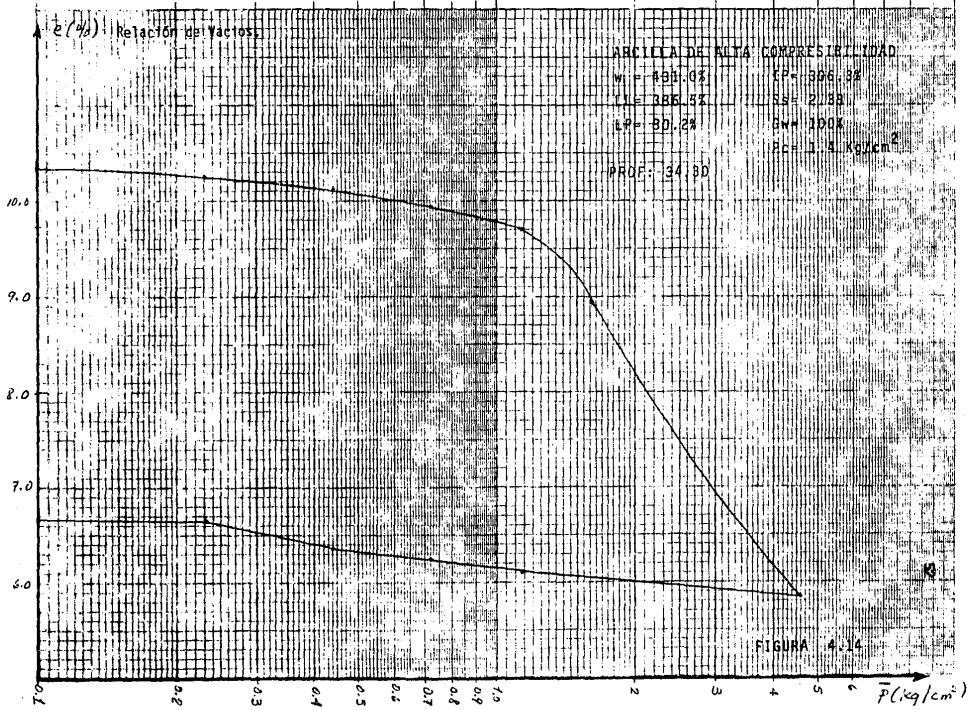












B. 1.- ALTERNATIVA 1

Teóricamente lo que se persigue en esta solución, es lograr una especie de compensación transversal, de tal suerte que al final de cuentas, el peso del relleno colocado sea del mismo orden que el del recortado, con lo cuál no solo se lograría reducir el espesor del relleno, sino también el ancho en que éste se aplicara, lo que se traduciría en una reducción sustancial de los posteriores asentamientos.

Consideremos el siguiente modelo para efectos del cálculo de los asentamientos:

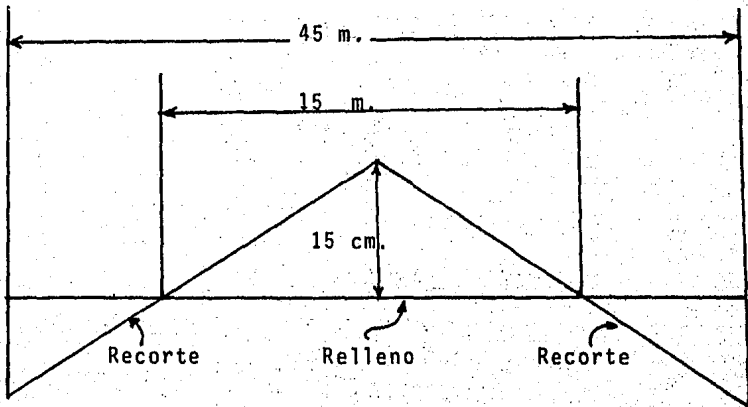


FIGURA 4.15

Supondremos que el relleno que se coloca tendrá un espesor de 15 cm. al centro de la sección y que el concreto asfáltico empleado tiene un peso volumétrico de 2.166 ton/m^3 .

Se calcularán a continuación los asentamientos al centro de la sección. De antemano podemos afirmar que en las orillas, teóricamente los asentamientos serían nulos debido al recorte y las expansiones -- producidas, además de ser de pequeña magnitud, buena parte de ellas se produciría con simultaneidad a la descarga y por consiguiente, su efecto sería neutralizado al colocar la nueva carpeta que como se mencionó, sería necesario colocar por razones de acabado.

a) Cálculo del asentamiento al centro de la sección

Al centro de la sección tenemos:

$$P_o = \gamma H$$

$$P_o = 2.166 \text{ ton/m}^3 \times 0.15 \text{ m.}$$

$$P_o = 0.325 \text{ ton/m}^2$$

Considerando que la carga actuante es del tipo triangular y con el objeto de calcular los esfuerzos verticales inducidos en la masa del suelo por la carga anterior será empleada la gráfica mostrada en la figura 4.16 desarrollada por Hamilton-Gray.

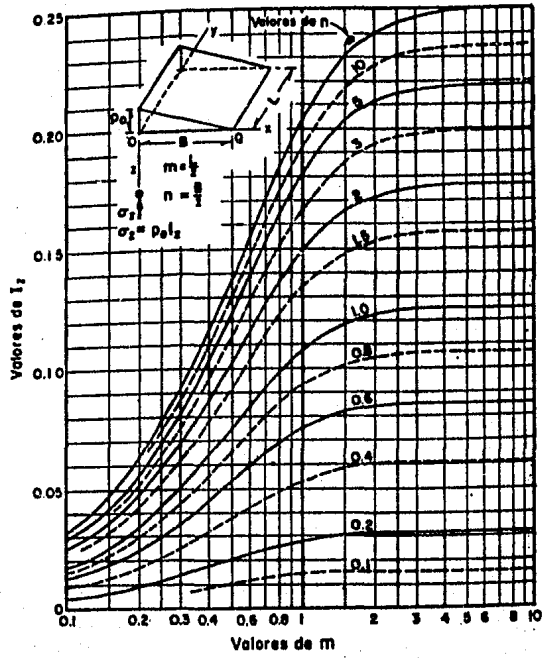


FIGURA 4.16

El punto de la pista donde contamos con información sobre la compresibilidad del suelo bajo ella se encuentra localizado en el cadenamiento 1+280 como se muestra a continuación:

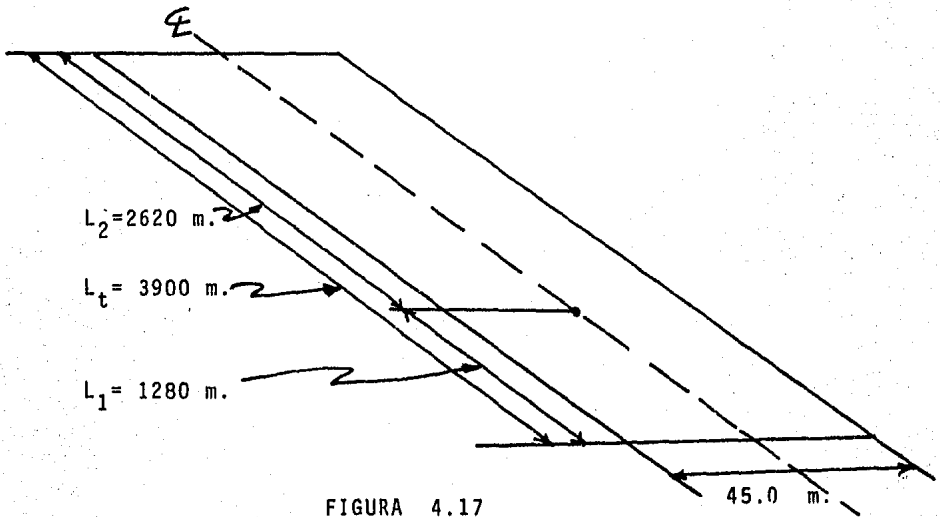


FIGURA 4.17

En base a los resultados de compresibilidad que se tienen, se calculará la magnitud del esfuerzo vertical a las siguientes profundidades: 2.5, 5.1, 7.35, 9.80, 12.90, 15.50, 17.90, 20.90, 26.30 y 34.30 metros.

Para $z = 2.5 \text{ m.}$

$$m_1 = L_1/z = 1280/2.5 = 512$$

$$m_2 = L_2/z = 2620/2.5 = 1048$$

$$n_1 = n_2 = B/z = 7.5/2.5 = 3.00$$

De la gráfica de la figura 4.16 obtenemos con m_1 y n_1 :

$$I_{z_1} = 0.2000$$

Por lo tanto:

$$\sqrt{z_1} = P_o \times I_{z_1} \quad P_o = 0.0325 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sqrt{z_1} = 0.0325 \text{ Kg/cm}^2 \times 0.2000$$

$$\sqrt{z_1} = 0.0065 \text{ Kg/cm}^2$$

El valor anterior del esfuerzo, debe duplicarse en vista de que la gráfica empleada para obtener el valor de influencia (I_z) es para la mitad de la carga por lo que:

$$\sqrt{z_1} = 0.013 \text{ Kg/cm}^2$$

Considerando ahora los valores de m_2 y n_2 y observando la misma figura 4.16 podemos afirmar -- que:

$$\sqrt{z_1} = \sqrt{z_2}$$

Por lo que:

$$\Delta \sqrt{z}(2.5 \text{ m.}) = 0.026 \text{ Kg/cm}^2$$

De la misma manera se tienen para las -- demás profundidades los siguientes valores:

PROFUNDIDAD (m.)	$\Delta \sigma$ (Kg/cm ²)
5.10	0.0201
7.35	0.0163
9.80	0.0134
12.90	0.0109
15.50	0.0089
17.90	0.0080
20.90	0.0072
26.30	0.0062
34.30	0.0043

FIGURA 4.18

Los cálculos del asentamiento se resumen en el cuadro de la figura 4.19 .

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (cm)	Z_i (m)	P_o Kg/cm^2	e_o (%)	$\Delta \sigma$ (Kg/cm^2)	P_f (Kg/cm^2)	e_f (%)	Δe	σ_r	m_r	ΔH (cm)
1	1,85-3,00	115	2,5	0,36	1,719	.0260	0,39	1,714	0,005	0,186	0,068	0,210
2	3,00-5,20	220	5,1	0,42	5,550	.0201	0,44	5,545	0,005	0,249	0,038	0,168
3	5,20-8,00	280	7,35	0,44	11,200	.0163	0,46	11,177	0,023	1,411	0,116	0,529
4	8,00-11,00	300	9,80	0,52	3,100	.0134	0,53	3,080	0,020	1,493	0,364	1,463
5	11,00-14,50	350	12,90	0,56	8,045	.0109	0,57	8,040	0,005	0,459	0,051	0,195
6	14,50-17,70	320	15,50	0,64	12,691	.0089	0,65	12,650	0,041	4,607	0,336	0,957
7	17,70-20,00	230	17,90	0,66	13,891	.0080	0,67	13,881	0,009	1,125	0,076	0,140
8	20,00-26,00	600	20,90	0,70	5,53	.0078	0,71	5,520	0,010	1,282	0,196	0,919
9	26,00-32,00	600	26,30	0,85	8,78	.0062	0,86	8,780	0,004	0,645	0,066	0,245
10	32,00-35,63	363	34,30	1,08	9,73	.0043	1,08	----	----	----	----	=====

4,8262 cm.

Figura 4.19 CALCULO DEL ASENTAMIENTO AL CENTRO DE LA SECCION EMPLEANDO LA ALTERNATIVA 1

Como se puede observar, los asentamientos de la sección en su parte central siguiendo esta alternativa serían del orden de 5 cm. según los resultados de la teoría. Esta magnitud evidentemente deja de tener importancia, ya que no modificaría apreciablemente la conformación de la superficie de rodamiento.

Ahora bien, desde un punto de vista práctico, la ejecución de esta solución topa con el problema de los niveles existentes de las rejillas de drenaje longitudinal que evacúan las aguas pluviales que recoge el pavimento de la pista, ya que al recortar las orillas de ella, se quedaría a un nivel inferior al de la rejilla.

B. 2.- ALTERNATIVA 2

De igual manera que en el análisis de la primer alternativa, los asentamientos serán calculados para el punto central de la sección así como también para un punto en la orilla de ésta. La posición de dichos puntos sobre la pista es la misma que en el caso anterior. En esta ocasión consideraremos el siguiente modelo para efectos del cálculo del asentamiento:

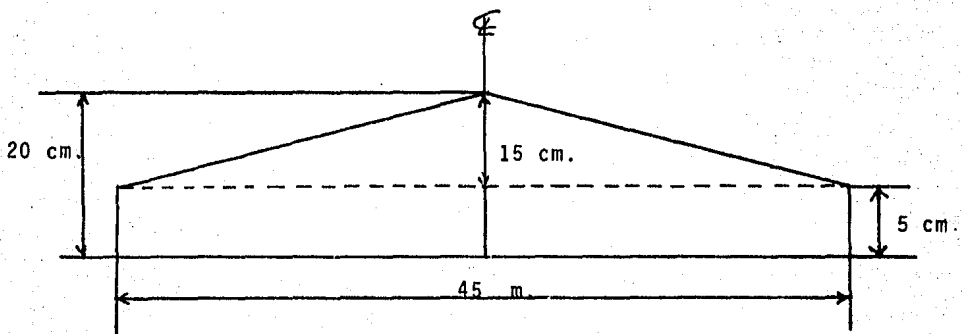


FIGURA 4.20

a) Análisis del asentamiento al centro de la sección

Como se puede observar la carga actuante es una combinación del caso triangular y el correspondiente a una carga uniformemente distribuida.

mos: Considerando la carga triangular tene-

$$P_o = \gamma H$$

$$P_o = 2.166 \text{ ton/m}^3 \times 0.15 \text{ m.}$$

$$P_o = 0.3249 \text{ ton/m}^2$$

De la misma manera en que fué hecho el análisis anterior pero considerando ahora un valor de -- B igual a 22.5 m. tenemos:

DISTRIBUCION DEL ESFUERZO VERTICAL INDUCIDO
POR LA CARGA TRIANGULAR

PROFUNDIDAD (m.)	$\Delta \sigma$ (Kg/cm ²)
2.50	0.0302
5.10	0.0276
7.35	0.0260
9.80	0.0238
12.90	0.0216
15.50	0.0201
17.90	0.0185
20.90	0.0161
26.30	0.0143
34.30	0.0120

FIGURA 4.21

Considerando la carga uniformemente distribuida tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Area de la sección transversal} \\ &= 45 \text{ m.} \times 0.05 \text{ m.} \\ &= 2.25 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volúmen por unidad de ancho} &= 2.25 \text{ m}^3 \\ \text{Peso} &= 2.166 \text{ Ton/m}^3 \times 2.25 \text{ m}^3 = 4.8735 \text{ Ton.} \end{aligned}$$

Dicho peso actúa sobre un área de 45 m^2 - (considerando un ancho unitario), por lo que:

$$\begin{aligned} w &= 4.8735 \text{ ton} / 45 \text{ m}^2 \\ w &= 0.1083 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

Empleando la gráfica de la figura 4.22 desarrollada por Fadum, tenemos:

$$\text{Para } z = 2.5 \text{ m. :}$$

$$m_1 = X_1/z = 1280/2.5 = 512$$

$$m_2 = Y/z = 22.5/2.5 = 9$$

$$\text{de donde: } w_{\theta 1} = 0.251$$

$$z_1 = w \times w_{\theta 1} = 0.1083 \text{ ton/m}^2 \times 0.251$$

$$z_1 = 0.0272 \text{ ton/m}^2 = 0.00272 \text{ Kg/cm}^2$$

Dicho valor debe duplicarse ya que corresponde solo a la mitad de la carga por lo que:

$$z_1 = 0.00544 \text{ Kg/cm}^2$$

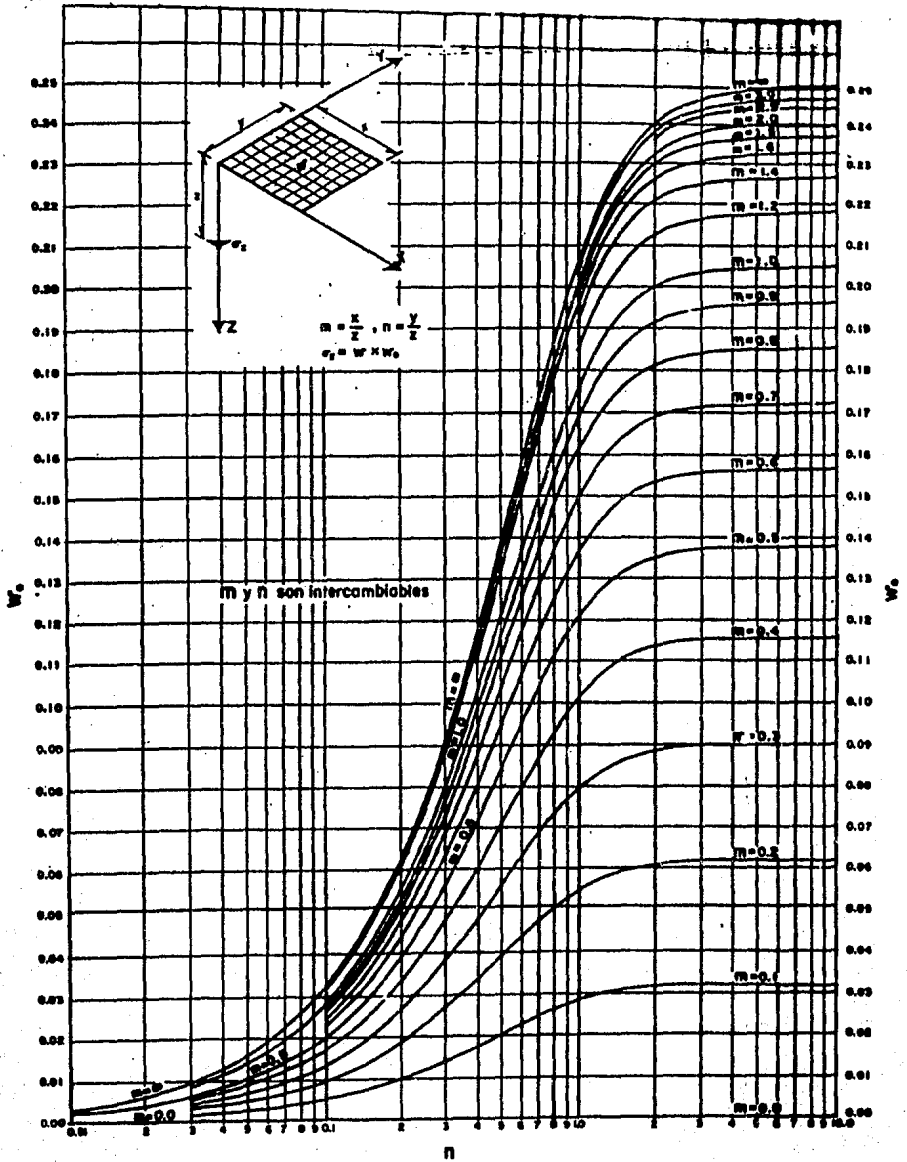


FIGURA 4.22 INFLUENCIA DE UNA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA SOBRE UN AREA RECTANGULAR.

Considerando ahora la otra sección de
la pista:

$$m_2 = X_2/z = 2620/2.5 = 1048$$

$$n_1 = Y/z = 22.5/2.5 = 9$$

$$w_{o2} = 0.251$$

del resultado anterior podemos concluir:

$$\sigma_{z_1} = \sigma_{z_2} \quad \text{de donde:}$$

$$\sigma_{\text{Total}} (2.5 \text{ m.}) = 0.01088 \text{ Kg/cm}^2$$

de la misma manera que en los casos anteriores tenemos:

DISTRIBUCION DEL ESFUERZO VERTICAL INDUCIDO
POR LA CARGA UNIFORME

PROFUNDIDAD (m)	$\Delta \sigma$ (Kg/cm ²)
2.50	0.0108
5.10	0.1080
7.35	0.0107
9.80	0.0105
12.90	0.0102
15.50	0.0097
17.90	0.0092
20.90	0.0091
26.30	0.0083
34.30	0.0072

FIGURA 4.23

Habiendo calculado la distribución del -
esfuerzo vertical inducido por ambas cargas, deberán --
sumarse ambos efectos con el objeto de obtener el valor
total de éstos actuando sobre la masa del suelo.

Empleando los estratos y datos de compre
sibilidad usados en el análisis de la primer alternativa
se presenta en el cuadro resumen de la figura 4.24 el -
cálculo del asentamiento al centro de la sección.

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (cm)	z_i (m)	P_0 (kg/cm^2)	e_0 (%)	ΔG (kg/cm^2)	P_f (kg/cm^2)	e_f (%)	Δe	σ_r	τ_{rv}	ΔH (cm)
1	1.85-3.00	115	2.5	0.36	1.719	0.0411	0.401	1.714	0.005	0.1217	0.0447	0.2115
2	3.00-5.20	220	5.1	0.42	5.550	0.0384	0.458	5.540	0.010	0.2604	0.0398	0.3359
3	5.20-8.00	280	7.35	0.44	11.200	0.0367	0.477	11.17	0.030	0.8174	0.0670	0.6885
4	8.00-11.00	300	9.80	0.52	3.10	0.0343	0.554	3.08	0.020	0.5831	0.1422	1.4634
5	11.00-14.50	350	12.90	0.56	8.045	0.0318	0.592	7.99	0.06	1.8868	0.2086	2.3217
6	14.50-17.70	320	15.50	0.64	12.691	0.0298	0.670	12.615	0.08	2.6846	0.1961	1.8698
7	17.70-20.00	230	17.90	0.66	13.891	0.0277	0.690	13.81	0.08	2.8881	0.1939	1.2356
8	20.00-26.00	600	20.90	0.70	5.53	0.0252	0.725	5.50	0.03	1.1905	0.1823	2.7565
9	26.00-32.00	600	26.30	0.85	8.776	0.0226	0.873	8.774	0.002	0.0885	0.0091	0.1227
10	32.00-35.63	363	34.30	1.08	9.73	0.0192	1.094	9.72	0.01	0.5208	0.0485	0.3383

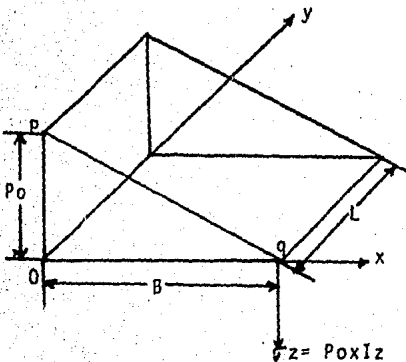
11.344 cm.

Figura 4.24 CALCULO DEL ASENTAMIENTO AL CENTRO DE LA SECCION EMPLEANDO LA ALTERNATIVA 2

b) Análisis del asentamiento en una grilla de la sección

Para este análisis, el cálculo de la distribución de los esfuerzos verticales en la masa del suelo inducidos por la sobrecarga, se hará de manera distinta a como se ha efectuado en vista de que el punto en cuestión se encuentra en un extremo de la sección. Para el caso de la carga triangular, los valores de influencia de la sobrecarga serán calculados con la gráfica mostrada en la figura 4.25.

VALORES DE INFLUENCIA INDUCIDOS POR UNA CARGA TRIANGULAR
EN EL PUNTO a



$$m = L/z$$

$$n = B/z$$

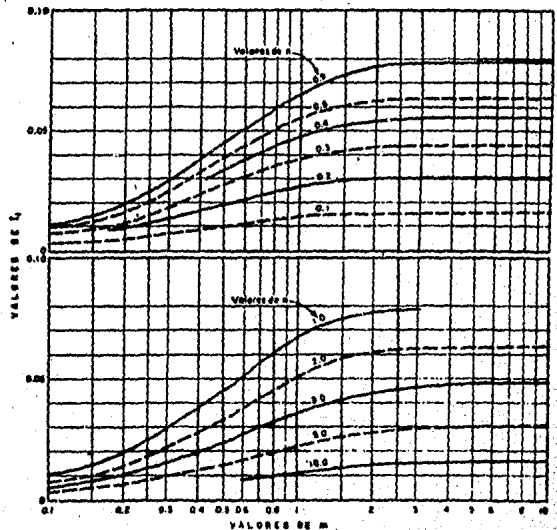


FIGURA 4.25

Considerando la carga uniformemente distribuida, los esfuerzos verticales son calculados en forma similar al análisis hecho para el centro de la sección - mediante la gráfica de la figura 4.22, pero teniendo en cuenta que el punto en cuestión es diferente que en el -- caso anterior.

Después de realizar el análisis del efecto de ambas cargas obtenemos la siguiente distribución de esfuerzos verticales:

DISTRIBUCION DE ESFUERZOS VERTICALES INDUCIDOS POR LA CARGA APLICADA EN LA ALTERNATIVA 2 BAJO UNA ORILLA DE LA SECCION DE LA PISTA

PROFUNDIDAD (m.)	$\Delta \sigma$ (Kg/cm ²)
2.50	0.0067
5.10	0.0076
7.35	0.0086
9.80	0.0092
12.90	0.0101
15.50	0.0114
17.90	0.0130
20.90	0.0114
26.30	0.0116
34.30	0.0114

FIGURA 4.26

El cálculo del asentamiento se presenta en el cuadro de la figura 4.27

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (cm)	Z_i (m)	P_o (kg/cm ²)	e_o (%)	ΔV (kg/cm ²)	P_f (kg/cm ²)	e_f (%)	Δe	a_r	m_r	ΔH (cm)
1	1.85-3.00	115	2.5	0.36	1.719	0.0067	0.37	1.718	0.001	0.1490	0.0548	0.0423
2	3.00-5.20	220	5.1	0.42	5.550	0.0076	0.43	5.540	0.01	1.3158	0.2009	0.3359
3	5.20-8.00	280	7.35	0.44	11.20	0.0086	0.45	-----	-----	-----	-----	-----
4	8.00-11.00	300	9.80	0.52	3.10	0.0092	0.53	3.090	0.01	1.0870	0.2651	0.7317
5	11.00-14.50	350	12.90	0.56	8.045	0.0101	0.57	8.030	0.015	1.4851	0.1642	0.5804
6	14.50-17.70	320	15.50	0.64	12.691	0.0114	0.65	12.68	0.011	0.9649	0.0705	0.2571
7	17.70-20.00	230	17.90	0.66	13.891	0.0130	0.67	-----	-----	-----	-----	-----
8	20.00-26.00	600	20.90	0.70	5.530	0.0114	0.71	5.52	0.01	0.8772	0.1343	0.9188
9	26.00-32.00	600	26.30	0.85	8.776	0.0116	0.86	8.76	0.016	1.3793	0.1411	0.9821
10	32.00-35.63	363	34.30	1.075	9.73	0.0114	1.09	9.71	0.02	1.7544	0.1635	0.6766

4.5249 cm.

Figura 4.27 CALCULO DEL ASENTAMIENTO EN UNA ORILLA DE LA SECCION EMPLEANDO LA ALTERNATIVA 2

Como se puede observar en la figura siguiente, los asentamientos producidos por el empleo de esta solución son considerables comparados con los que se obtienen para la primera alternativa analizada.

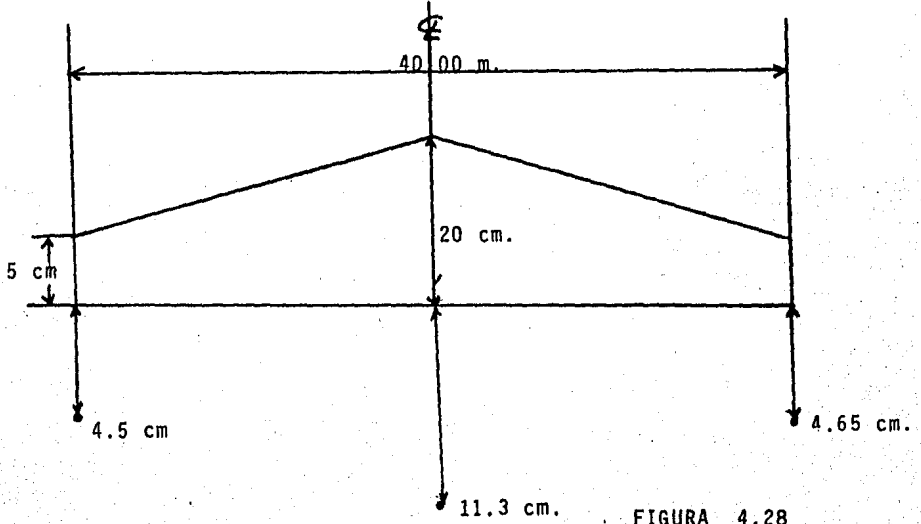


FIGURA 4.28

C._ SOLUCION EMPLEADA

De los resultados obtenidos podemos observar que la alternativa más desfavorable es la segunda, consistente en colocar, sin recorte previo, un relleno de concreto asfáltico para restituirle el bombeo a la sección transversal de la pista.

La primer alternativa, es decir el recorte, ha demostrado a lo largo del desarrollo teórico efectuado ser muy favorable en vista de que al aplicarla se estaría descargando al suelo, de ahí su empleo. La tercer alternativa como fué explicado anteriormente, anularía el incremento de presiones en la zona central de la pista y el pequeño incremento de presión en las orillas de ésta favorecería a la conservación del bombeo en ella. La aplicación de únicamente esta alternativa hubiera implicado un elevado costo así como un prolongado período de ejecución razón por la cual, solo se consideró conveniente aplicarla en los tramos de la pista más afectados por los asentamientos y los agrietamientos de la carpeta asfáltica los cuales fuéron los comprendidos entre los cadenamientos 1+500 al 1+900 y 2+899 al 3+060.

El procedimiento constructivo empleado en la rehabilitación de la pista comprendió el empleo de las alternativas descritas mediante la ejecución de 3 conceptos básicos: Bacheo, Renivelación y Sobrecarpeta nue -

a continuación se describen:

a) Bacheo

Se efectuaron dos tipos: el bacheo tradicional que se aplicó en el 11% de la longitud de la pista y el bacheo profundo comprendiendo la construcción de secciones compensadas, el cuál fué aplicado en el 14% de la longitud de la pista.

Bacheo Superficial

El procedimiento general consistió en las siguientes operaciones básicas:

- Excavación en caja, hasta una profundidad que osciló entre los 25 y 30 cm. Para llevar a cabo esta operación primeramente se delineó la superficie del bache mediante una máquina cortadora. En seguida con un tractor D-7 se levantaron las capas de concreto asfáltico mediante pasadas sucesivas del escarificador y la cuchilla de la máquina; simultáneamente y en forma coordinada un cargador frontal, carga el material excavado a los camiones de volteo los cuales acarrean el material a los lugares destinados expreso.

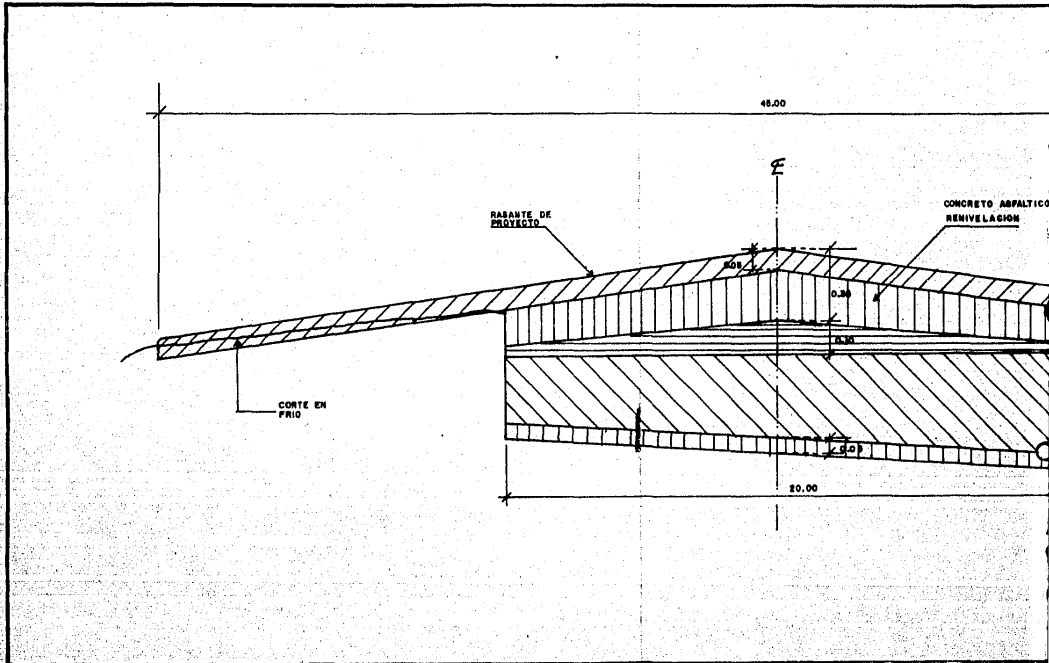
- Una vez efectuada la excavación y limpiado el fondo de la caja, se conforma y compacta la superficie descubierta hasta el grado conveniente. Posterior al barrido de la superficie descubierta en la zona de bacheo se dió un riego de liga con producto asfáltico FR-3 a razón de 0.5 lt/m^2 .

- Enseguida se colocan las capas de pavimento previstas en el proyecto, siguiendo el procedimiento normalizado de tendido y compactación. En este tipo de bacheo, solo se colocaron capas de concreto asfáltico puesto que las profundidades de excavación fueron bajas y solo llegaron por lo general a capas subyacentes de carpeta o bien a la capa de base hidráulica; por consiguiente las capas referidas fueron tendidas y compactadas por máquinas terminadoras llamadas también esparcidores que traen acoplado un sistema de nivelación automático que permite tender el espesor deseado de carpeta.

Bacheo Profundo (Sección Compensada):

Por lo que se refiere a la sección compensada empleada en este tipo de bacheo, después de compactada la superficie descubierta se colocó una plantilla de concreto asfáltico de 5 cm. de espesor tendida y compactada conforme a lo indicado en el inciso anterior. Enseguida se colocaron las capas de tezontle, material ligero de partículas gruesas, con adecuada capacidad estructural. Esta capa compactada con rodillo vibratorio ligero tiene un espesor promedio de 35 cm. Al nivel inferior de esta capa se colocó previamente un colector a base de tubos de concreto perforado, que constituyen un elemento importante en el sistema de subdrenaje. La sección tipo de este sistema se ilustra en la figura 4.29 .

- Colocación de Geored.- A efecto de dar resistencia a la tensión a la estructura del pavimento reconstruida en los tramos en que se llevó a cabo el bacheo profundo y con el objeto de evitar en lo posible el que se vuelvan a formar las grietas transversales se consideró --



pertinente integrar a la estructura de la sección compensada la colocación de una malla o membrana en diferentes capas para que le diera a la estructura dicha resistencia a la tensión.

Entre los productos estudiados para determinar el que fué utilizado para lograr el fin perseguido se encuentran los Geotextiles y las Georedes.

Se optó por escoger estas últimas para ser utilizados en vías de prueba por considerar que se podían obtener resultados satisfactorios.

Considerando la importancia que tiene la aplicación de este tipo de materiales, se describirán de una manera general y sin pretender profundizar en ello, algunos conceptos básicos sobre lo que son los Geotextiles y las Georedes.

Los Geotextiles o membranas para la Ingeniería Civil están definidos por la A.S.T.M. como cualquier tela que puede ser permeable o impermeable empleada con materiales geotécnicos como parte integral de un proyecto hecho por el hombre, estructura o sistema.

Estas membranas pueden hacerse de polipropileno, poliéster, nylon, polietileno o alguna combinación de estos. El uso de membranas naturales en la industria de la construcción probablemente data de décadas o siglos cuando algún innovador individual con la idea de reforzar -

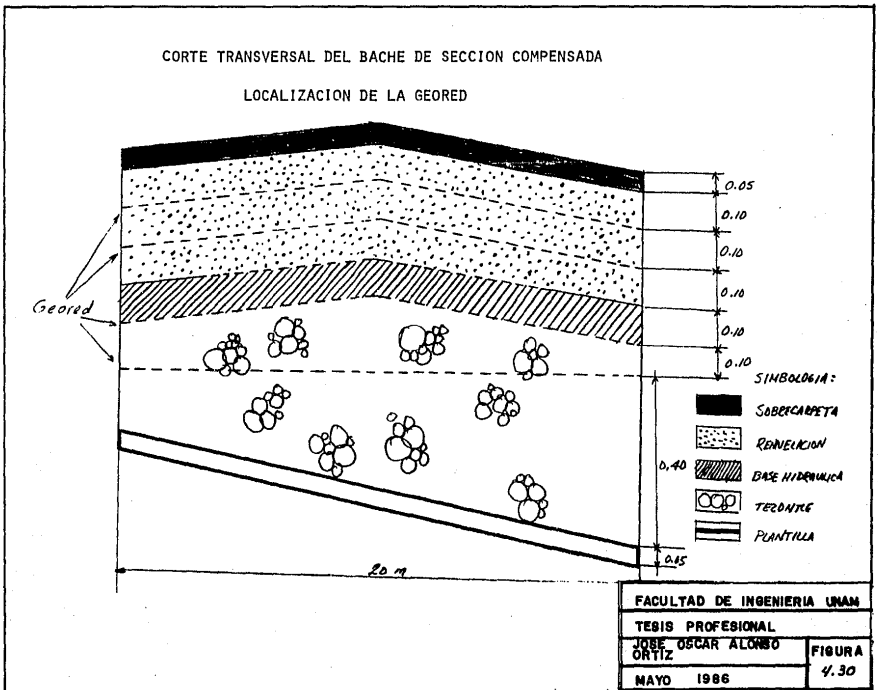
el suelo blando, decidió enterrar la membrana dentro del material. El concepto de enterrar paja, pieles y troncos en arcilla podría ser considerado dentro de esta categoría. En este caso, la aplicación de un geotextil -- sería como refuerzo de subrasantes de bajo valor relativo de soporte. El concepto es teóricamente válido debido a que la membrana decrece el nivel del esfuerzo en el suelo de cimentación debido al esfuerzo cortante horizontal inducido por la fricción generada entre el suelo y el geotextil y movilizó por las cargas verticales. Esto hace que la membrana trabaje a tensión (similar a la acción de una varilla pretensada en concreto reforzado) lo cuál distribuye la carga sobre un área más grande y por esto -- decrece su intensidad, un decremento en el esfuerzo significa menor probabilidad de falla y/o menores asentamientos.

El mismo principio anteriormente descrito es aplicable al caso de la Geored empleada en la sección compensada, con la salvedad de que no fué la subrasante la que se reforzó, sino que prácticamente el refuerzo fué aplicado a la sección estructural de la pista con el objeto de distribuir convenientemente las tensiones que se producen en el seno de las capas de pavimento y evitar la aparición de grietas en la superficie de rodamiento.

La localización de la Geored se detalla en las figuras 4.30 y 4.31 . Es importante hacer notar que este sistema, normalmente aplicado en capas de terracería constituye un procedimiento novedoso en México, al aplicarse por primera vez para una pista aérea y entre capas de pavimento.

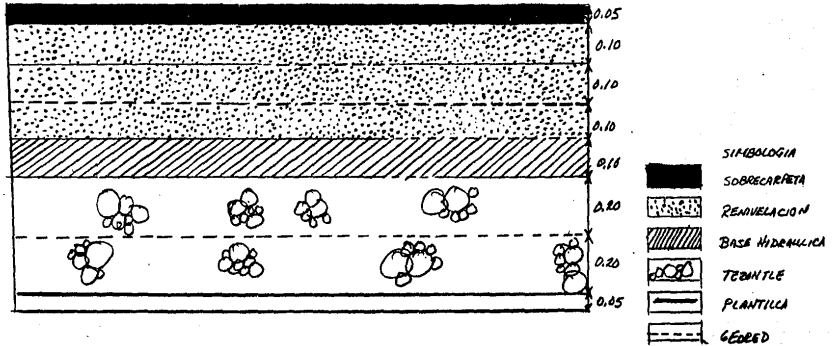
CORTE TRANSVERSAL DEL BACHE DE SECCION COMPENSADA

LOCALIZACION DE LA GEORED



CORTE LONGITUDINAL DEL BACHE DE SECCION COMPENSADA

LOCALIZACION DE LA GEORED



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM	
TESIS PROFESIONAL	
OSCAR ALONSO ORTIZ	FIGURA
MAYO 1986	4.31

b) Renivelación

Las operaciones de renivelación se llevaron a cabo utilizando dos procedimientos, cada uno de los cuales fué aplicado de acuerdo a los requerimientos de la rasante de proyecto. Por una parte se realizó el corte en frío de las zonas de la carpeta que quedaban por encima de una superficie situada 5 cm. abajo de la rasante de proyecto. Por otra parte se ejecutó el relleno de las zonas con depresiones de tal manera que se obtuviera una superficie paralela a la rasante de proyecto situada 5 cm. abajo de la misma.

En el primer caso, es decir el corte en frío, se utilizó una técnica aún poco extendida en México la cual consiste en el empleo de máquinas fresadoras cuyo elemento básico consiste en un tambor provisto de un conjunto de dientes escarificadores de acero al alto manganeso con alma de tungsteno y que al girar a una determinada velocidad va desbastando la superficie de pavimento hasta la profundidad deseada la cual es controlada a través de sensores hidráulicos automáticos que siguen un hilo nivelado topográficamente en forma paralela a la rasante de proyecto. Como resultado de dicho perfilado se obtiene -- una superficie rugosa, la cual permite una adecuada adherencia con la sobrecarpeta que se le coloca posteriormente.

El material cortado de la carpeta antigua se presenta en forma disgregada y tiene la particularidad de poder ser recortado para ser utilizado principalmente en capas no superficiales de pavimento. Una vez cortado

dicho material es cargado inmediatamente por la misma re-perfiladora a camiones de volteo, mediante una banda transportadora. Estas operaciones continuas de corte y carga simultaneas del material, se realizan en forma precisa y rápida, lo que constituye en sí una técnica constructiva interesante.

Por lo que se refiere al segundo caso, es decir, el relleno de depresiones o renivelación propiamente dicha, se llevó a cabo en las zonas de hundimientos previamente identificadas por medio de topografía de precisión. Se puede decir que las operaciones básicas fueron las siguientes:

- Picado mediante un rodillo pesado con tacones, remolcado por un tractor agrícola, esta operación tiene por objeto proporcionar una superficie de anclaje para la capa asfáltica reniveladora que se coloque posteriormente.

- Tendido y compactación de las capas reniveladoras de concreto asfáltico, con espesores máximos de 10 cm., se coloca el número necesario de capas hasta alcanzar el nivel inferior de la sobrecarpeta que constituirá la superficie de rodamiento.

Al respecto y de acuerdo al proyecto, se tuvieron que renivelar zonas con depresiones máximas hasta de 30 cm; en zonas de corte se tuvieron espesores máximos de 10 cm., valores de magnitud considerable que dan una idea de las irregularidades que presentaba la pista.

c) Sobrecarpeta

La capa final de concreto asfáltico que se construyó, una vez terminadas las operaciones descritas anteriormente, fué la sobrecarpeta. Esta capa se construyó con un espesor uniforme de 5 cm. en toda la superficie de la pista. En esta etapa, por constituir la capa de -- rodamiento, se extremaron los controles durante su construcción.

El material pétreo empleado fué una mezcla de grava y arena bien graduada según el criterio del S.U.C.S., con un porcentaje máximo de 10% pasando la malla No 200 y con tamaño máximo de partículas de 19 mm. cumpliendo además los siguientes requisitos:

- Contracción Lineal: 2% Máximo.
- Desgaste de Los Angeles: 40% Máximo.
- Partículas alargadas y/o en forma de - laja: 35% Máximo.
- Equivalente de arena: 70% Mínimo.
- Porcentaje de partículas trituradas: 70% Mínimo.

El producto asfáltico empleado fué cemento asfáltico del No. 6 y el proyecto de la mezcla asfáltica y control durante su elaboración se efectuó mediante el procedimiento Marshall, habiendo cumplido con los requisitos que se indican en seguida:

- Estabilidad: 700 Kg. Mínimo
- Flujo: 2 - 4 mm.
- Vacíos en mezcla: 3 - 8 %
- La mezcla se compactó al 95% del peso volumétrico máximo de la prueba Marshall.
- Permeabilidad en la carpeta: Menor al 10%.

Para aceptar la carpeta se considerarán las siguientes tolerancias:

Niveles:	± 0.5 cm.
Espesores:	± 0.5 cm.
Profundidad de las depresiones:	0.5 cm. Máximo.

La profundidad de las depresiones se determinó colocando una regla de 5 m. de longitud para la pista y los rodajes; paralela y normal al eje longitudinal, tanto en las zonas de bacheo, capa reniveladora y sobrecarpeta.

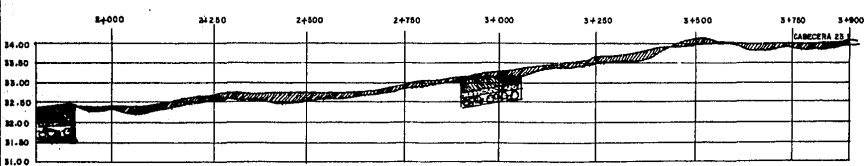
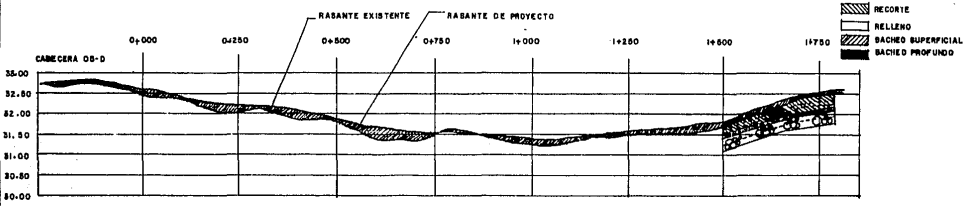
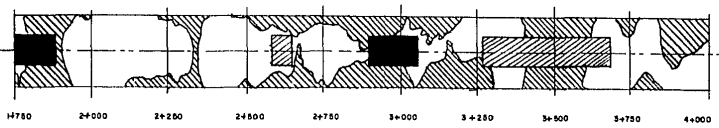
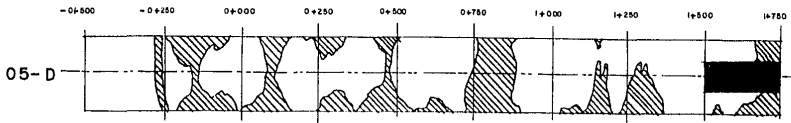
C A P I T U L O V

EVALUACION PRELIMINAR POSTERIOR A LA REHABILITACION

Con el objeto de verificar la eficacia de los procedimientos empleados en la rehabilitación de la pista 05D-23I se presenta a continuación una evaluación del estado que guardó la superficie de rodamiento un año después de haberla rehabilitado. Para ello, se hará uso de la información obtenida de 2 estudios topográficos efectuados a la pista, uno en Abril de 1984 -- inmediatamente después de terminados los trabajos de rehabilitación y antes de abrirla a la operación y otro en Marzo de 1985. Estos estudios consistieron en obtener el perfil longitudinal del eje de la pista así como secciones transversales de ella a cada 20 metros en ambas ocasiones.

En capítulos anteriores fueron obtenidos algunos valores estimados teóricos del asentamiento de la pista al centro de su sección, dependiendo del tipo de solución propuesta para restituirle las características necesarias que le permitieran operar en condiciones óptimas. En el presente capítulo, se podrá observar el asentamiento real de la pista, relacionándolo con el tipo de trabajo efectuado durante la rehabilitación de 1984.

En la figura 5.1 se presenta un plano en planta de la pista en el que se indica la ubicación de los trabajos efectuados en la rehabilitación y descritos en el capítulo anterior, en la misma figura, se presenta también un corte longitudinal del eje de la pista en donde se puede observar la posición de la rasante existente en el año de 1984 antes de efectuarse la reha-



PERFIL LONGITUDINAL

- ESPESOR DE CARPETA
- CONCRETO ASFALTICO
- BASE HIDRAULICA
- REZONTE
- GEODES

- RECORTO
- RELLENO
- SACADO SUPERFICIAL
- SACADO PROFUNDO

FACULTAD DE INGENIERIA UNAN	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE OSCAR ALONSO ORTIZ	
FIGURA	5.1
MAYO 1988	

bilitación y la de la rasante de proyecto que sirvió de base para restituirle a la pista las características - necesarias para su correcto funcionamiento a través de la renivelación que como se mencionó, consistió fundamentalmente en realizar recortes y rellenos de la superficie de rodamiento. En esta figura podemos apreciar los fuertes espesores de concreto asfáltico que hubo que aplicar, así como los recortes realizados, lo anterior al centro de la sección y que nos da una idea de las irregularidades que presentaba la pista. Por lo que respecta al resto de la sección no tenemos un valor exacto de que tanto se recortó y rellenó la superficie de rodamiento - ya que esto estuvo en función de los requerimientos de la rasante de proyecto así como de la pendiente transversal necesaria para darle a la sección de la pista el bombeo - requerido razón por la cual, podemos afirmar que el espesor del relleno hacia las orillas fué menor que al centro de la sección.

Con la información anterior y después de realizar un análisis de los resultados obtenidos de los - estudios topográficos efectuados se ha preparado una evaluación del comportamiento de la pista en el lapso de un año, posterior a su rehabilitación.

Con el fin de simplificar en lo más posible la evaluación, solo se analizarán 4 tramos de la pista que se ha considerado son los más representativos del - comportamiento experimentado por ella en función del tipo de procedimiento empleado en la rehabilitación.

Con el objeto de poder interpretar más -

fácilmente los resultados observados en dichos tramos, se ha creído conveniente no solo enlistar una serie de números representativos de las deformaciones sufridas por la pista, sino que también se ha incluido un pequeño análisis estadístico de las deformaciones que se presentaron en su eje longitudinal. Dicho análisis consistió en obtener el asentamiento promedio observado en cada tramo así como la dispersión de las deformaciones con respecto a su valor medio (desviación estandar), una tabla de frecuencias que permitió obtener un histograma donde se observa la distribución empírica de los datos y un ajuste de esta distribución a una Teórica del tipo Normal estandarizada.

Fué necesario, para poder hacer más consistentes los resultados del análisis estadístico, elegir una longitud de 160 m. para cada tramo estudiado, lo que nos permitió considerar el mismo número de datos en los cuatro casos mencionados y que fué de 33.

Con la finalidad de relacionar los resultados del tratamiento estadístico de los datos, en la figura 5.2 se han graficado en forma conjunta las curvas representativas de las distribuciones teóricas ajustadas para cada uno de los tramos considerados lo que nos permitirá efectuar comparaciones y nos llevará a plantear las conclusiones pertinentes respecto a las ventajas y desventajas de los procedimientos empleados.

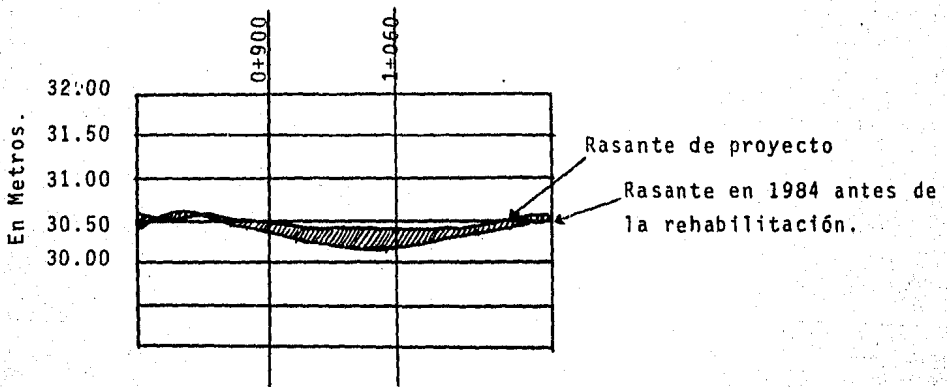
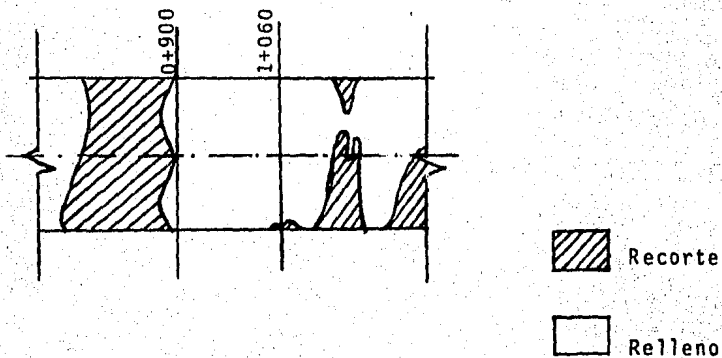
Como se mencionó, adicional al análisis estadístico se presenta para cada tramo, información respecto a su ubicación y tipo de trabajo utilizado en su rehabilitación así como una relación de las deformaciones diferen

ciales y de las pendientes transversales que se observaron en las secciones correspondientes al tramo en estudio obtenidas a cada 20 metros un año después de la rehabilitación.

T R A M O 1

Ubicación: 0+900 al 1+060

Procedimiento Empleado: Relleno a todo lo ancho de la Sección.

PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE DE LA PISTALOCALIZACION DE LOS TRABAJOS

DEFORMACIONES DIFERENCIALES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES
DE EFECTUADA LA REHABILITACION (Lapso de 1984 a 1985)

DEFORMACIONES DIFERENCIALES (cm)

CADENA- MIENTO.	$\delta_{\text{máx}} - \delta_{\text{mín}}$	LADO IZQUIERDO					ρ	LADO DERECHO					$\delta_{\text{máx}} - \delta_{\text{mín}}$
		22.5	20.0	15.0	10.0	5.0		5.0	10.0	15.0	20.0	22.5	
0+900	1.5	5.5	6.0	6.0	7.0	7.0	7.0	7.0	5.0	6.0	6.0	5.0	2.0
0+920	2.5	6.5	6.5	7.0	8.0	8.5	9.0	8.5	7.5	8.0	7.5	7.0	2.0
0+940	3.0	9.0	7.0	8.0	8.0	10.0	9.0	10.0	9.0	8.5	9.5	8.0	2.0
0+960	3.0	8.0	8.5	8.5	9.0	10.5	11.0	11.0	10.0	9.0	8.0	8.0	3.0
0+980	2.5	7.5	7.5	9.0	9.0	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	7.5	8.0	2.5
1+000	2.5	7.0	7.5	8.0	8.5	8.5	9.5	9.0	8.0	9.0	9.0	7.0	2.5
1+020	2.5	7.5	8.5	9.5	10.0	9.5	9.0	9.0	8.5	8.0	7.5	7.0	2.0
1+040	3.0	8.0	8.5	10.0	10.0	11.0	10.0	9.5	9.0	9.0	7.5	7.5	2.5
1+060	4.0	9.0	8.0	10.5	10.5	11.0	12.0	10.5	9.5	10.0	8.0	7.5	4.5

PROMEDIO 7.5 7.5 8.5 8.8 9.5 8.5 8.4 8.4 7.7 6.2

PENDIENTES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

LADO IZQUIERDO				LADO DERECHO		
CAD.	%	ESTACION		%	ESTACION	
		DEL	AL		DEL	AL
0+900	0.80	0.00	22.50	0.73	0.00	22.50
0+920	1.02	0.00	22.50	0.93	0.00	22.50
0+940	1.15	0.00	22.50	1.15	0.00	22.50
0+960	1.24	0.00	22.50	1.24	0.00	22.50
0+980	1.10	0.00	22.50	1.20	0.00	22.50
1+000	1.28	0.00	22.50	1.26	0.00	22.50
1+020	1.24	0.00	22.50	1.13	0.00	22.50
1+040	1.24	0.00	22.50	1.07	0.00	22.50
1+060	0.97	0.00	22.50	0.88	0.00	22.50

PROMEDIO: 1.755%

1.065%

ASENTAMIENTOS DEL EJE DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)	CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)
0+900	7.0	0+985	10.0
0+905	7.0	0+990	11.0
0+910	8.0	0+995	10.5
0+915	8.0	1+000	9.5
0+920	9.0	1+005	9.5
0+925	9.0	1+010	10.0
0+930	9.0	1+015	10.0
0+935	11.0	1+020	9.0
0+940	9.0	1+025	10.5
0+945	9.0	1+030	9.0
0+950	10.5	1+035	9.5
0+955	11.0	1+040	10.0
0+960	11.0	1+045	10.5
0+965	10.5	1+050	9.5
0+970	9.0	1+055	10.0
0+975	9.5	1+060	12.0
0+980	10.0		

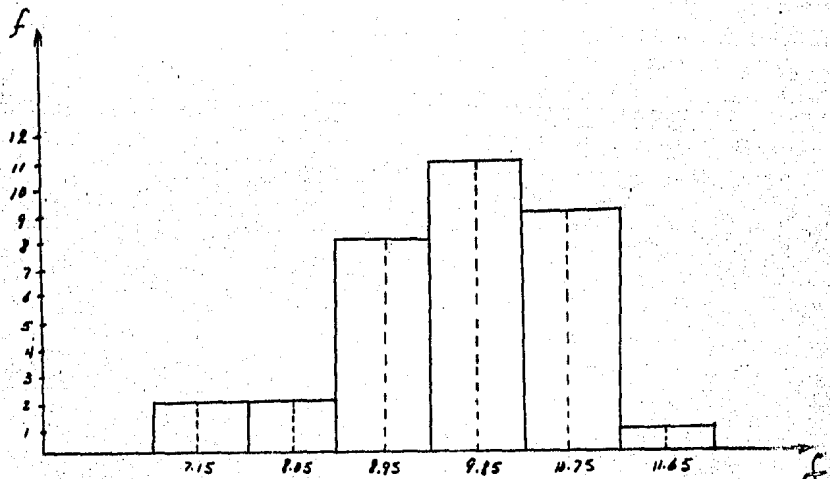
ANALISIS ESTADISTICO DEL ASENTAMIENTO DEL EJE DE LA PISTA

TRAMO 1 (0+900 a 1+060)

Tamaño de la muestra (n) = 33

Media (\bar{x}) = 9.6363 cm.Desviación Estándar (σ) = 1.1028TABLA DE FRECUENCIAS

Marca de clase (cm)	Intervalos de clase (cms)	Frecuencia
7.15	6.7 - 7.6	2
8.05	7.6 - 8.5	2
8.95	8.5 - 9.4	8
9.85	9.4 - 10.3	11
10.75	10.3 - 11.2	9
11.65	11.2 - 12.1	1

HISTOGRAMA :

Para verificar si es válido ajustar la distribución empírica a una distribución teórica del tipo normal estandarizada se presenta a continuación la prueba de bondad de ajuste también conocida como Prueba χ^2 .

j	x_j	Z_j	A_j	ΔA_j	e_j	o_j	$(o_j - e_j)/e_j$
1	7.6	-1.85	0.0322	0.0322	1.06	2	0.2
2	8.5	-1.03	0.1515	0.1193	3.94	2	
3	9.4	-0.21	0.4168	0.2653	8.75	8	0.064
4	10.3	0.61	0.7291	0.3123	10.31	11	0.046
5	11.2	1.43	0.9236	0.1945	6.42	9	
6	12.1	2.25	0.9878	0.0642	2.12	1	0.2496

$$\chi^2 = \sum (o_j - e_j)^2 / e_j = 0.560$$

En los desarrollos anteriores tenemos:

x_j = Límites de clase.

$Z_j = (x_j - \bar{X}) / \sigma$

A_j = Área a la izquierda de Z_j (Curva Normal)

$\Delta A_j = A_j - A_{(j-1)}$

e_j = Frecuencia esperada = $n \Delta A_j$

o_j = Frecuencia observada.

Considerando que el número de grados de libertad $\mathcal{D} = 4 - 2 - 1 = 1$ y con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), consultando de gráficas de la distribución χ^2 se tiene:

$$\chi_{1,0.05}^2 = 3.84 > 0.560$$

Lo anterior significa que el ajuste es aceptable, por lo tanto la ecuación de la curva de distribución normal será:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \left(\frac{x - \text{media}}{\sigma} \right)^2}$$

es decir:

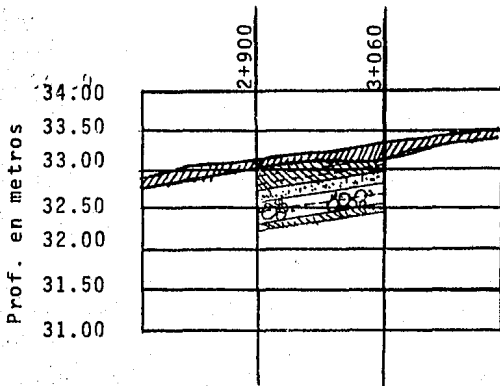
$$f(x) = \frac{1}{1.10 \sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \left(\frac{x - 9.64}{1.10} \right)^2}$$

Tabulando para valores de x comprendidos dentro del rango de las deformaciones presentes en el tramo se puede graficar la curva, situación que se puede observar en la figura 5.2

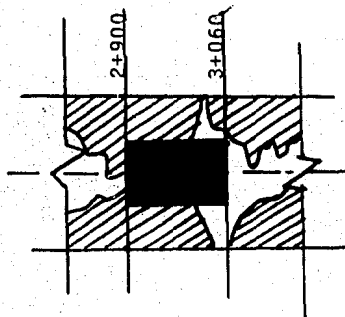
TRAMO 2


Ubicación: 2+900 a 3+060

Procedimiento Empleado: Sección Compensada.

PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE DE LA PISTA

Rasante de proyecto
 Rasante en 1984 antes de la
 rehabilitación.

LOCALIZACION DE LOS TRABAJOS

 Sección Compensada

 Recorte

 Relleno

DEFORMACIONES DIFERENCIALES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES
DE EFECTUADA LA REHABILITACION (Lapso de 1984 a 1985)

DEFORMACIONES DIFERENCIALES (cm)

CADENA- MIENTO.	$\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{m\acute{i}n}$	LADO IZQUIERDO						LADO DERECHO						$\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{m\acute{i}n}$
		22.5	20.0	15.0	10.0	5.0	C _L	5.0	10.0	15.0	20.0	22.5		
2+900	3.0	3.0	5.0	4.0	2.0	3.5	4.6	4.8	3.5	3.0	1.2	2.3	3.6	
2+920	3.0	1.2	1.0	1.8	2.0	4.0	4.0	4.5	2.0	2.0	2.0	1.5	3.0	
2+940	4.3	1.0	1.5	1.8	2.8	4.1	5.3	4.0	1.8	2.0	0.8	1.5	4.5	
2+960	3.6	2.5	2.5	2.4	3.5	4.0	6.0	4.5	2.2	1.0	1.8	0.0	6.0	
2+980	1.9	2.8	2.1	2.8	3.2	4.1	4.0	3.2	1.7	1.6	0.4	0.8	3.6	
3+000	2.2	2.4	2.0	2.0	3.0	3.5	4.2	4.2	2.0	1.8	0.4	1.2	3.8	
3+020	3.2	1.2	2.0	1.5	2.0	3.8	4.4	2.7	2.3	2.1	1.8	2.4	2.6	
3+040	3.5	0.0	1.0	1.5	2.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	2.0	1.8	1.7	
3+060	4.3	0.5	2.0	2.0	2.4	4.2	4.8	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	2.0	

PROMEDIO : 1.62 2.12 2.2 2.54 3.85 4.05 2.55 2.27 1.48 1.61

PENDIENTES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

LADO IZQUIERDO				LADO DERECHO		
CAD.	%	ESTACION		%	ESTACION	
		DEL	AL		DEL	AL
2+900	0.66	0.00	22.50	0.66	0.00	22.50
2+920	0.55	0.00	22.50	0.55	0.00	22.50
2+940	0.46	0.00	22.50	0.44	0.00	22.50
2+960	0.53	0.00	22.50	0.26	0.00	22.50
2+980	0.57	0.00	22.50	0.53	0.00	22.50
3+000	0.57	0.00	22.50	0.44	0.00	22.50
3+020	0.53	0.00	22.50	0.64	0.00	22.50
3+040	0.57	0.00	22.50	0.62	0.00	22.50
3+060	0.46	0.00	22.50	0.66	0.00	22.50

PROMEDIO: 0.54%

0.53%

ASENTAMIENTOS DEL EJE DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)	CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)
2+900	4.6	2+985	3.8
2+905	5.0	2+990	3.8
2+910	5.0	2+995	3.0
2+915	4.8	3+000	4.2
2+920	4.0	3+005	3.0
2+925	4.0	3+010	4.0
2+930	5.5	3+015	3.5
2+935	4.8	3+020	4.4
2+940	5.3	3+025	3.8
2+945	5.8	3+030	4.0
2+950	5.5	3+035	3.5
2+955	4.0	3+040	3.5
2+960	6.0	3+045	4.4
2+965	5.5	3+050	4.4
2+970	4.6	3+055	5.0
2+975	4.4	3+060	4.8
2+980	4.0		

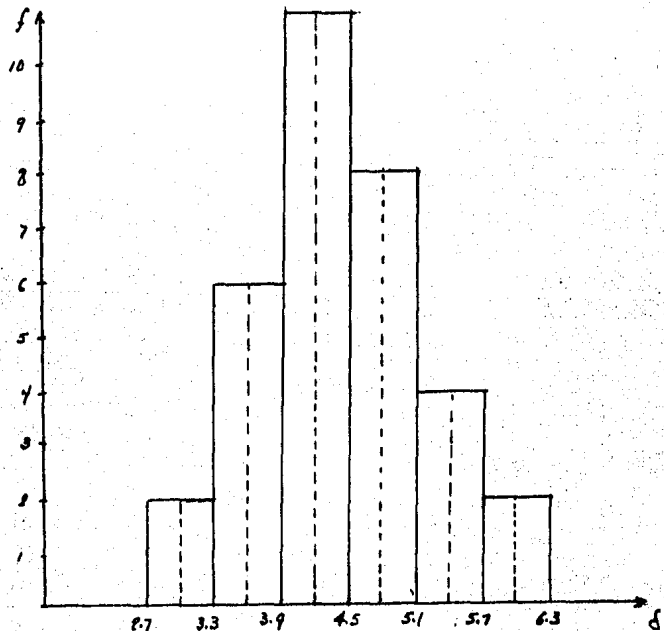
ANALISIS ESTADISTICO DEL ASENTAMIENTO DEL EJE DE LA PISTA

. TRAMO 2 (2+900 al 3+060)

Tamaño de la muestra (n) = 33

Media (\bar{x}) = 4.4242Desviación Estándar (σ) = 0.75919TABLA DE FRECUENCIAS

Marca de clase (cm)	Intervalos de clase (cms)	Frecuencia
3.0	2.7 - 3.3	2
3.6	3.3 - 3.9	6
4.2	3.9 - 4.5	11
4.8	4.5 - 5.1	8
5.4	5.1 - 5.7	4
6.0	5.7 - 6.3	2

HISTOGRAMA :

De manera similar al caso anterior se demuestra que es válido el ajuste a una distribución de tipo Normal por lo que la ecuación representativa será:

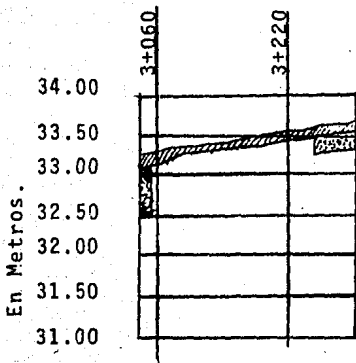
$$f(x) = \frac{1}{0.76 \sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \left(\frac{x - 4.42}{0.76} \right)^2}$$

La gráfica correspondiente se presenta en la figura 5.2

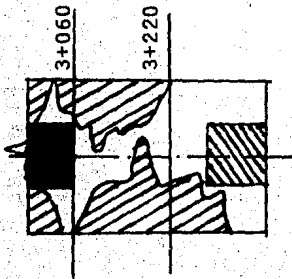
TRAMO 3

Ubicación: 3+060 al 3+220

Procedimiento empleado: Recorte en orillas.

PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE DE LA PISTA

Rasante de proyecto

Rasante en 1984 antes de la
la rehabilitación.LOCALIZACION DE LOS TRABAJOS

■ Bacheo Profundo
(Sección Compensada)

▨ Bacheo Superficial

▨ Recorte

□ Relleno

DEFORMACIONES DIFERENCIALES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES
DE EFECTUADA LA REHABILITACION (lapso de 1984 a 1985)

DEFORMACIONES DIFERENCIALES (cm)

CADENA- MIENTO	$\delta_{\text{máx}} - \delta_{\text{mín}}$	LADO IZQUIERDO					C_L	LADO DERECHO					$\delta_{\text{máx}} - \delta_{\text{mín}}$
		22.5	20.0	15.0	10.0	5.0		5.0	10.0	15.0	20.0	22.5	
3+060	4.5	0.5	2.0	2.0	2.4	4.2	5.0	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	2.0
3+080	3.0	2.0	2.0	2.4	3.0	3.5	5.0	5.8	4.5	5.0	3.5	3.5	2.3
3+100	2.5	2.0	2.5	3.0	3.2	4.5	4.5	5.3	4.8	4.5	3.5	3.5	1.8
3+120	3.0	1.5	2.0	2.5	1.0	3.5	4.0	4.8	3.5	3.0	3.0	2.8	2.0
3+140	2.9	1.8	1.6	2.8	3.0	3.5	4.5	3.5	3.0	2.4	2.3	2.0	2.5
3+160	2.2	2.0	1.2	1.5	2.4	2.5	3.4	3.4	3.2	2.0	1.3	1.0	2.4
3+180	3.6	0.0	1.5	2.0	3.0	4.0	3.6	3.0	2.0	1.5	2.5	1.0	2.6
3+200	3.6	4.0	6.0	6.5	6.8	7.0	3.4	6.0	5.3	5.2	4.8	4.2	1.8
3+220	1.5	4.0	3.0	2.8	3.0	3.0	2.5	3.0	1.8	0.6	0.4	0.0	2.5
PROMEDIO:		1.97	2.42	2.83	3.08	3.96		4.42	3.62	3.13	2.7	2.3	

PENDIENTES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

LADO IZQUIERDO				LADO DERECHO		
CAD.	%	ESTACION		%	ESTACION	
		DEL	AL		DEL	AL
3+060	0.46	0.00	22.50	0.66	0.00	22.50
3+080	0.57	0.00	22.50	0.77	0.00	22.50
3+100	0.64	0.00	22.50	0.68	0.00	22.50
3+120	0.64	0.00	22.50	0.65	0.00	22.50
3+140	0.53	0.00	22.50	0.60	0.00	22.50
3+160	0.60	0.00	22.50	0.60	0.00	22.50
3+180	0.62	0.00	22.50	0.64	0.00	22.50
3+200	0.66	0.00	22.50	0.60	0.00	22.50
3+220	0.88	0.00	22.50	0.66	0.00	22.50

PROMEDIO: 0.622%

0.651%

ASENTAMIENTOS DEL EJE DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)	CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)
3+060	5.00	3+145	4.00
3+065	4.50	3+150	3.60
3+070	5.50	3+155	3.00
3+075	5.00	3+160	3.40
3+080	5.00	3+165	4.00
3+085	5.00	3+170	4.50
3+090	5.00	3+175	4.00
3+095	5.50	3+180	3.60
3+100	4.50	3+185	3.60
3+105	4.50	3+190	2.50
3+110	4.50	3+195	2.50
3+115	4.50	3+200	3.40
3+120	4.00	3+205	2.50
3+125	3.00	3+210	2.50
3+130	3.00	3+215	2.50
3+135	4.00	3+220	2.50
3+140	4.50		

ANALISIS ESTADISTICO DEL ASENTAMIENTO DEL EJE DE LA PISTA

TRAMO 3 (3+060 a 3+220)

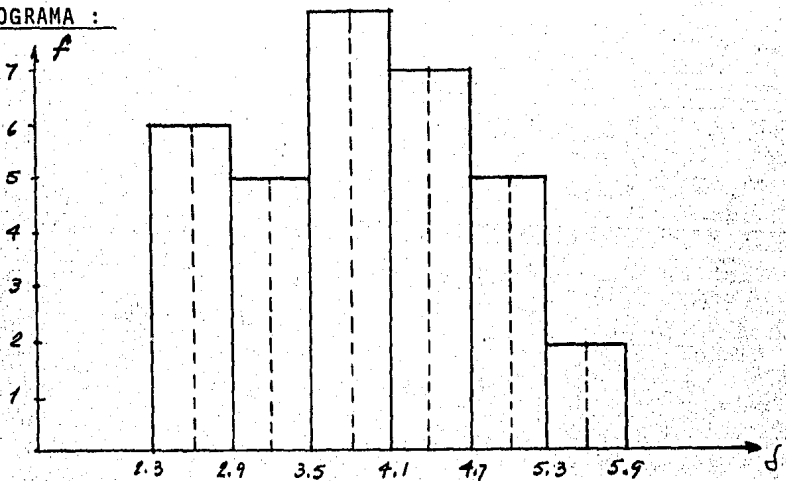
Tamaño de la muestra (n) = 33

Media (\bar{x}) = 3.912

Desviación Estándar (G) = 0.932

TABLA DE FRECUENCIAS

Marca de clase (cm)	Intervalos de clase (cms)	Frecuencia
2.6	2.3 - 2.9	6
3.2	2.9 - 3.5	5
3.8	3.5 - 4.1	8
4.4	4.1 - 4.7	7
5.0	4.7 - 5.3	5
5.6	5.3 - 5.9	2

HISTOGRAMA :

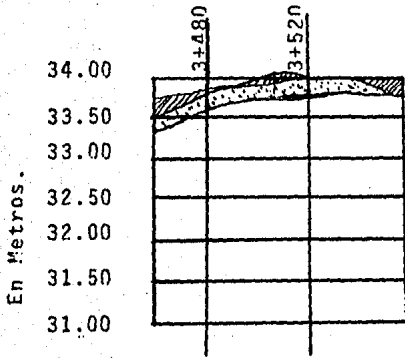
De igual manera, la ecuación de la curva Normal correspondiente a los datos de éste tramo es :

La gráfica correspondiente se muestra en la --
figura 5.2

TRAMO 4

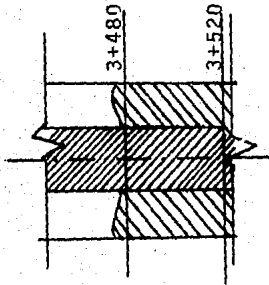

Ubicación: 3+420 al 3+580

Procedimiento empleado: Recorte a todo lo ancho.


PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE DE LA PISTA

Rasante de proyecto

Rasante en 1984 antes de la rehabilitación.

LOCALIZACIÓN DE LOS TRABAJOS
 Racheo Superficial

 Recorte

 Relleno

DEFORMACIONES DIFERENCIALES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES

DE EFECTUADA LA REHABILITACION (Lapso de 1984 a 1985)

DEFORMACIONES DIFERENCIALES (cm)

CADENA- MIENTO	$\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{mfn}$	LADO IZQUIERDO					C _L	LADO DERECHO					$\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{mfn}$
		22.5	20.0	15.0	10.0	5.0		5.0	10.0	15.0	20.0	22.5	
3+420	1.3	-1.8	-1.0	-0.8	-0.8	-0.5	-0.5	-0.8	-0.5	-0.3	-0.3	0.0	0.5
3+440	2.6	-3.8	-2.4	-2.0	-2.0	-1.2	-1.3	-2.0	-2.0	-2.0	-1.8	-1.5	0.7
3+460	2.6	-3.8	-2.5	-2.0	-1.8	-1.2	-1.5	-1.0	-2.0	-1.8	-1.5	-1.2	1.0
3+480	1.5	-3.0	-2.3	-2.4	-2.2	-1.5	-1.6	0.8	-2.0	-2.0	-1.5	-1.5	1.2
3+500	1.3	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.5	-0.7	-2.0	-1.5	-2.5	-1.5	-2.0	1.8
3+520	1.0	-2.0	-2.0	-1.5	-2.0	-1.5	-1.0	-1.2	-1.2	-1.7	-2.0	-2.0	1.0
3+540	1.1	-1.1	-1.5	-1.8	-1.5	-1.8	-0.7	0.0	-1.2	-1.0	-1.0	0.0	1.2
3+560	0.8	-1.2	-1.5	-1.5	-1.8	-1.0	-1.0	-1.5	-1.5	-1.0	-1.2	0.0	1.5
3+580	1.8	0.0	0.0	0.0	0.4	1.8	0.5	1.8	1.2	1.2	2.5	2.0	2.0
PROMEDIO:		-2.07	-1.68	-1.55	-1.52	-0.93		-0.65	-1.18	-1.23	-0.92	-0.68	

PENDIENTES TRANSVERSALES DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE
LA REHABILITACION

LADO IZQUIERDO				LADO DERECHO		
CAD.	%	ESTACION		%	ESTACION	
		DEL	AL		DEL	AL
3+420	0.80	0.00	22.50	0.77	0.00	22.50
3+440	0.77	0.00	22.50	0.77	0.00	22.50
3+460	0.57	0.00	22.50	0.75	0.00	22.50
3+480	0.75	0.00	22.50	0.77	0.00	22.50
3+500	0.75	0.00	22.50	0.71	0.00	22.50
3+520	0.71	0.00	22.50	0.71	0.00	22.50
3+540	0.80	0.00	22.50	0.80	0.00	22.50
3+560	0.84	0.00	22.50	0.88	0.00	22.50
3+580	0.73	0.00	22.50	0.80	0.00	22.50

PROMEDIO: 0.746%

0.773%

ASENTAMIENTO DEL EJE DE LA PISTA UN AÑO DESPUES DE LA
REHABILITACION

CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)	CADENAMIENTO	ASENTAMIENTO (cm)
3+420	-0.50	3+505	-1.00
3+425	0.00	3+510	-1.50
3+430	-0.50	3+515	-1.00
3+435	0.00	3+520	-1.00
3+440	-1.30	3+525	-1.50
3+445	-0.50	3+530	-1.00
3+450	-1.10	3+535	-1.00
3+455	-1.50	3+540	-0.70
3+460	-1.50	3+545	-1.00
3+465	-1.00	3+550	-1.00
3+470	-1.00	3+555	-0.55
3+475	-1.50	3+560	-1.00
3+480	-1.60	3+565	-1.00
3+485	-1.60	3+570	-1.50
3+490	-1.50	3+575	-1.50
3+495	-0.50	3+580	0.50
3+500	-0.70		

ANALISIS ESTADISTICO DEL ASENTAMIENTO DEL EJE DE LA PISTA

TRAMO 4 (3+420 a 1 3+580)

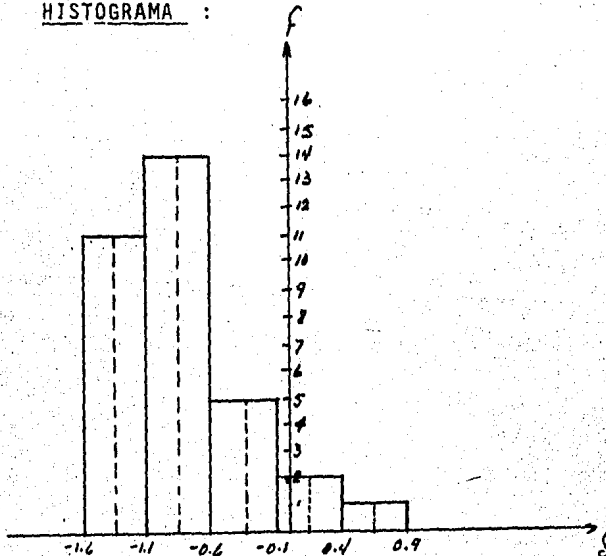
Tamaño de la muestra (n) = 33

Media (\bar{x}) = -0.939 cm

Desviación Estándar (G) = 0.609

TABLA DE FRECUENCIAS

Marca de clase (cm)	Intervalos de clase (cms)	Frecuencia
-1.35	-1.6 - -1.1	11
-0.85	-1.1 - -0.6	14
-0.35	-0.6 - -0.1	5
0.15	-0.1 - 0.4	2
0.65	0.4 - 0.9	1

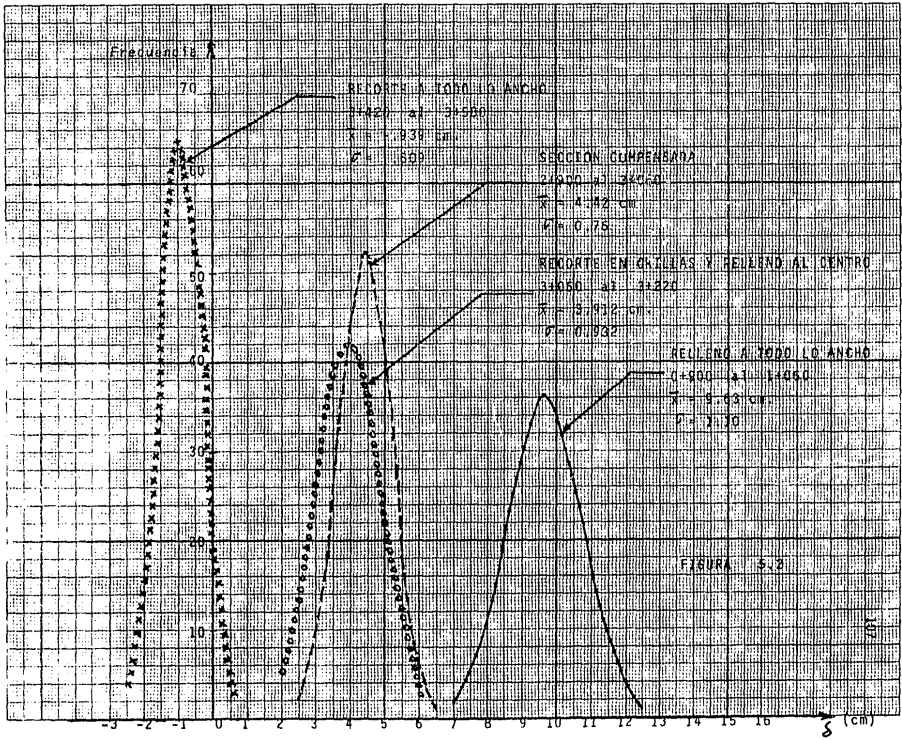
HISTOGRAMA :

Como complemento a la información que se muestra en la figura 5.2 se presenta a continuación una tabla donde se resumen los resultados de la evaluación.

Las deformaciones diferenciales reportadas en la columna 4 de dicho cuadro, fueron obtenidas de efectuar el promedio de la diferencia entre la máxima y la mínima deformaciones correspondientes a las secciones transversales analizadas para cada tramo.

El número entre paréntesis nos indica el orden en el que los resultados observados fueron más favorables.

Procedimiento Empleado	Valor Promedio de las deformaciones del eje longitudinal - (cm)	Dispersión de los valores de las deformaciones del eje longitudinal.	Valor Promedio de las deformaciones diferenciales en secciones transv. (cm)			Valor Promedio de la pendiente transversal en secciones - transversales. (%)		
			IZQ.	C _L	DER.	IZQ.	C _L	DER.
Recorte a todo - lo ancho (1)	-0.939 (1)	0.609 (1)	1.55	1.21 (1)	0.746	0.773 (2)		
Sección Compensada (3)	4.4242 (3)	0.760 (2)	3.20	3.42 (4)	0.54	0.53 (4)		
Recorte en orillas y relleno al centro (2)	3.912 (2)	0.932 (3)	2.97	2.21 (2)	0.62	0.65 (3)		
Relleno a todo lo ancho (4)	9.63 (4)	1.10 (4)	2.61	2.5 (3)	1.75	1.065 (1)		



Se puede observar que la solución que mejor se comportó fué el recorte de la carpeta asfáltica a todo lo ancho de la sección, en cuyas zonas de aplicación se presentaron inclusive algunos bafamientos debidos a la descarga efectuada. La dispersión de las deformaciones observadas al centro de la sección fué pequeña, lo anterior se traduce en una superficie de rodamiento más regular y uniforme. La tendencia a la conservación del bombeo en las secciones transversales de los tramos en que se efectuó el recorte fué mayor que en aquellos sitios -- en que solo se recortaron las orillas o bien se aplicó la sección compensada, la excepción de esto la constituyen -- aquellos tramos en que se efectuó el relleno a todo lo ancho de la sección, sin embargo, en estos sitios se observaron asentamientos diferenciales tanto en el sentido longitudinal como transversal muy grandes habiendo además una amplia dispersión en sus valores. Una de las desventajas del empleo del recorte, es como se mencionó al plantear -- ésta solución, el que las rejillas de drenaje localizadas a los lados de la pista, quedarían a un nivel superior al de ella, así como también sería necesario conformar nuevamente las franjas de seguridad dentro de las que esta comprendida la pista.

Por lo que se refiere a la Sección Compensada el asentamiento que se presentó en los 20 m. centrales de la pista en los que fué aplicada se observó que tuvo una magnitud discreta, sin embargo, su comportamiento no fué -- del todo satisfactorio como se esperaba. El bombeo de la sección en este caso se vió muy afectado disminuyendo considerablemente en su valor mínimo especificado del 1% debido principalmente a que en las orillas de la pista fué recortada la carpeta, lo anterior impidió que el relleno que

debió haberse colocado en las orillas de la pista funcio nara a manera de bermas de sobrecarga tal como se expuso en capitulos anteriores, lo que contribuyó también a un alto valor de las deformaciones diferenciales que se pre sentaron en dicho tramo. Además de lo anterior, ésta -- solución requiere de un tiempo prolongado de ejecución -- así como de una fuerte inversión económica.

Cabe señalar también que por lo que res- pecta a las grietas presentes en la pista debido a las -- tensiones producidas en el seno de las capas del pavimen- to así como al esfuerzo tangencial aplicado a la carpeta asfáltica por el efecto del frenaje de los aviones se -- viéron disminuidos, debido al uso de la Geored, lo ante- rior nos fué manifestado por personal autorizado de A.S.A. ante la imposibilidad de entrar a la pista a constatarlo personalmente sin embargo, se nos comentó que en algunos sitios de la pista en que fué aplicado el procedimiento anterior sí se presentaron algunas grietas.

Como ha sido señalado, los procedimientos empleados en la rehabilitación tuviéron que ajustarse a - los requerimientos de la rasante de proyecto, razón por la cual no se siguieron de una manera precisa los modelos propuestos y empleados en el cálculo teórico de los asen- tamientos presentados en el capítulo IV de éste trabajo, - sin embargo, hubo algunos sitios en que sí se pueden a-- proximar ambas condiciones como es el caso del tramo en que se efectuó recorte en las orillas y relleno al centro de la sección en el cual se tiene:

Asentamiento Calculado al centro de la
sección para un tiempo $t = \infty$ 4.82 cm.

Asentamiento Esperado en las orillas
de la sección 0.00 cm.

Asentamiento Observado al centro de la
sección en un año 3.912 cm.

Asentamiento Observado en las orillas
de la sección 1.97 cm (Izq.)
2.21 cm (Der.)

En el caso del tramo en que se efectuó el
relleno a todo lo ancho de la sección se tiene:

Asentamiento Calculado al centro de la
sección para un tiempo $t = \infty$ 11.34 cm.

Asentamiento Calculado en las orillas
de la sección 4.5 cm.

Asentamiento Observado al centro de la
sección en un año 9.63 cm.

Asentamiento Observado en las orillas
de la sección 7.5 cm (Der.)
6.16 cm (Izq.)

La diferencia entre los valores del asentamiento - calculado y el observado, puede atribuirse al hecho de que su cálculo fue realizado para un tiempo $t = \infty$ y en el año posterior a la sobrecarga aplicada en que se efectuaron las observaciones no se alcanzó a completar el proceso de consolidación del suelo; sin embargo existen algunos casos como el de los asentamientos observados en las orillas de la sección en los que sus valores superaron a los calculados, esto se debe a que los fuertes espesores de concreto asfáltico que se han acumulado hacen actuar a la sección estructural de la pista como una losa muy rígida que tiende a sufrir un asentamiento uniforme.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis realizado de los estudios de Mecánica - de Suelos así como de la evaluación cuantitativa se pueden hacer las siguientes conclusiones:

1.- Las instalaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, principalmente sus pistas y en especial la - 05D-23I, tienen un hundimiento general constante por renivelarse continuamente, dado que se encuentran ubicadas en una zona cuyo subsuelo es altamente compresible.

2.- Las deformaciones presentadas en los pavimentos de la pista 05D-23I son de tal magnitud y geometría, que afectan severamente las condiciones de operación en ella, poniendo en grave peligro la seguridad de las aeronaves, si no se atienden oportunamente.

3.- Con la finalidad de restituirle a la superficie de rodamiento las características necesarias para su correcto funcionamiento, ha sido necesario someter a la pista a un mantenimiento mayor consistente fundamentalmente, en colocar sobrecarpetas de concreto asfáltico de 20 cm. de espesor en promedio, con una periodicidad - aproximada de 3 años y medio, lo cuál representa además de un alto costo, la necesidad de cerrar la pista, lo que dificulta la realización de las operaciones aeronáuticas. Lo anterior ha originado que se tengan espesores de concreto asfáltico que oscilan entre 0.5 m. y 1.20 m., los que actúan como una sobrecarga que en el corto plazo, origina nuevos asentamientos y deformaciones de la superficie de rodamiento.

4.- Durante toda la historia del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se han efectuado un gran número de estudios geotécnicos con el fin de proponer una solución definitiva al problema de los asentamientos que presentan las pistas. Los resultados de estas investigaciones han conducido a proponer diversos métodos de rehabilitación que han sido estudiados y evaluados a lo largo del presente trabajo.

En la rehabilitación efectuada a la pista en el mes de --
Abril de 1985 fueron aplicados tres tipos de solución:

a) Renivelación mediante una combinación de relleno y recorte de la carpeta asfáltica de tal manera que se lograra una compensación transversal, es decir que el peso del relleno colocado fuera del mismo orden que el del recortado. En este caso se trató de llevar a cabo el relleno al centro de la sección y el recorte en las orillas de ésta; sin embargo, debido a los requerimientos de la rasante de proyecto, fue necesario en algunos tramos, efectuar solamente el recorte a todo lo ancho de la sección.

b) Renivelación mediante la colocación de un espesor de concreto asfáltico al centro de la sección y desvaneciéndolo hacia las orillas para darle a la pista el efecto de bombeo deseado.

c) Compensación por sustitución de masas del peso -- del concreto asfáltico que se ha acumulado en las renivelaciones efectuadas anteriormente, abriendo un cajón en los 20 m. centrales de la pista con el objeto de restituir parcialmente el material removido por material ligero de manera tal que el peso de la nueva sección fuera prácticamente igual al del existente. La Sección anterior fué reforzada con una Geored.

Al observar los resultados de las mediciones del comportamiento de la pista en distintos tramos representativos de ella --

un año después de realizada la rehabilitación se comprueba que los a asentamientos se abaten en gran proporción en aquellos tramos donde - fue aplicada la compensación mediante el recorte y relleno de la - sección de la pista y aún más en aquellos tramos en los que solo - se efectuó el recorte de la carpeta a todo lo ancho de ella.

5.- La diferencia que existe entre los asentamientos teóricos calculados y los observados presentados en el capítulo anterior y producidos por la sobrecarga impuesta en cada una de las alternativas empleadas durante la rehabilitación se puede atribuir a diversos factores tales como:

a) Para el cálculo del asentamiento teórico fue -- empleada la información proveniente de un sondeo ubicado en el cadenamiento 1+280 con determinadas características geotécnicas y las observaciones reportadas provienen de sitios diferentes al anterior.

b) Para calcular los asentamientos se emplearon - algunos modelos representativos de las condiciones impuestas por - las alternativas mencionadas, que no se ajustaron totalmente a los - procedimientos empleados durante la rehabilitación en cuanto a los espesores de los rellenos y recortes efectuados debido a los requererimientos de la rasante de proyecto.

c) Como fue mencionado al final del capítulo anterior, los fuertes espesores de concreto asfáltico que se han acumulado hacen actuar a la sección de la pista como una losa rígida que tiende a asentarse de manera uniforme lo que hace que los asentamientos observados en las orillas de la sección sean mayores que los - calculados para las condiciones en que fueron analizados.

d) El cálculo del asentamiento fue hecho considerando la carga muerta representada por la sobrecarga de concreto asfáltico y no se tomó en cuenta la carga viva inducida por el trán-

sito de las aeronaves debido a que éstas se presentan de una manera aleatoria así como también no fueron tomados en cuenta los efectos ocasionados por sismo.

e) Aunado a lo anterior hay que tomar en cuenta, que la información de las características geotécnicas del subsuelo después de los primeros 20 m. de profundidad empleados en los cálculos, se extrapolaron de un sondeo ubicado fuera de la pista, además, en el año posterior a la rehabilitación no se ha producido el 100% de consolidación del suelo.

Independientemente de la diferencia que existió -- entre los valores del asentamiento calculado con los resultados obtenidos en la evaluación efectuada, se ha demostrado que el asentamiento de las pistas existe y que cada vez es más severo lo que nos lleva a proponer las siguientes recomendaciones:

1.- Con el objeto de determinar con precisión las causas que originan el hundimiento de la pista, se recomienda que se haga un estudio de cada tramo en particular, para lo cual será necesario efectuar una zonificación de la pista en función de su comportamiento observado empleando para esto, métodos que pueden ser -- estadísticos como el presentado en este trabajo, así como la realización de una adecuada instrumentación consistente en efectuar con mas frecuencia estudios topográficos, tomando como base siempre el mismo banco de nivel para poder contar en el futuro con una estadística confiable de los desplazamientos de los tramos tipo en que se haya zonificado la pista.

2.- En cuanto a las grietas que se siguen presentando en algunas zonas de la pista y que van desde pequeñas fisuras hasta agrietamientos del orden de los 12 a 15 cm., se recomienda investigar y calcular la magnitud de los esfuerzos rasantes que se producen en el pavimento por el tren de aterrizaje de los aviones por medio de la instalación de deformímetros dentro de la sección estructu--

ral de la pista así como por medio de observaciones durante el aterrizaje de dichos aviones en las zonas de contacto y máximo freno y poder de esta forma proyectar carpetas reforzadas en esas zonas.

3.- De todos los métodos empleados, el más recomendado es la compensación mediante recortes y rellenos de la sección y de ser posible proyectar una rasante tal que implique solo el recorte de la sección, si se quiere seguir manteniendo a las -- pistas del Aeropuerto en condiciones óptimas, no solo de funcionamiento sino también de rentabilidad ya que este procedimiento retardaría la periodicidad con que los trabajos de rehabilitación se efectúan al evitarse la sobre carga que implica la colocación de la sobrecarpeta.

4.- El costo de la rehabilitación efectuada en el año de 1984 ascendió a la cantidad de \$335'013,505.00 Para el año de 1986 ha sido programada una nueva rehabilitación que se estima costará \$993'000,000.00 Lo anterior nos da una idea de los elevados costos que implica el realizar este tipo de trabajos y nos hace reflexionar sobre la necesidad de prolongar la periodicidad con que éstos se efectúan. Por lo mismo, se recomienda aunque implique un gasto fuerte, realizar una adecuada instrumentación del comportamiento de la pista así como efectuar todas aquellas obras inducidas por el recorte de la carpeta tales como la rectificación del sistema de drenaje y la renivelación de las franjas de seguridad con una periodicidad prolongada en lugar de estar continuamente invirtiendo millones de pesos en la aplicación de procedimientos que -- han demostrado no ser todo lo eficientes que se desea.

5.- Cualquier tipo de estructura, incluyendo las -

instalaciones del Aeropuerto ubicadas en terrenos altamente compresibles como lo es el subsuelo típico de la Cd. de México siempre representarán un costo muy elevado no solo de construcción sino también de mantenimiento.

B I B L I O G R A F I A

Aeropuertos y Servicios Auxiliares Rehabilitación de la Pista 05D-23I del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. México, Marzo-Abril, 1984.

Dirección General de Aeropuertos S.C.T. Revista Conmemorativa de su -- 20º Aniversario 1965-1985. México, D.F. 1985.

Gaytán Rufz, Francisco: Notas sobre los Antecedentes Históricos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. México, sin fecha.

Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso: Mecánica de Suelos Tomos I y II. Editorial LIMUSA, México, 1977.

Lai J.S, Robnett Q.L.: Use of Geotextiles to Extended Aggregated Resources. ASTM Symposium on Extending Aggregated Resources, Orlando, Fla, - December, 1980.

Moreno Bonett, Alberto y Jauffred J, Francisco: Elementos de Probabilidad y Estadística. Representaciones y Servicios de Ingeniería, México,- 1969.

Murray, R. Spiegel: Estadística. Serie Schaum Mc. Graw Hill, 1ª edición,- México, 1961.

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI): Normas y Métodos Recomendados Internacionales, Aeródromos. Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, Montreal, Canada, Marzo, 1983.

Rico, Alfonso y Del Castillo, Hermilo: La Ingeniería de Suelos en la Vías Terrestres. Volúmen 2, Editorial LIMUSA, México 1977.

Zeevaert, Leonardo: Estudio del Comportamiento de la Pista 05D-23I del - Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. México, 1977.

Geosol S.A.: Comportamiento de la pista 05D-23I México. D.F., 1984.