

## Evaluación de Pavimentos para Aeropuertos

En este trabajo se hacen algunas consideraciones sobre la filosofía y métodos de evaluación, con una descripción breve de tres estudios de índole diferentes, en aeropuertos colombianos, llevados a cabo por el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Instituto de Ensayos e Investigación.

El artículo fue presentado en el Tercer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos realizado en Cartagena del 22 al 27 de Octubre de 1979.

### MANUEL GARCIA LOPEZ

Profesor Asociado de la Universidad Nacional  
Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería  
Socio de Ingeniería y Geotecnia Ltda,  
Ingenieros Consultores

### LISANDRO BELTRAN MORENO

Profesor Asociado de la Universidad Nacional  
Jefe de la Sección de Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional.

El incremento en las operaciones aéreas y en el tamaño y peso de los aviones, ha traído como consecuencia la modificación de criterios de diseño y construcción de pavimentos para aeropuertos y la necesidad de evaluar la capacidad de carga de los ya existentes para definir si debe acudir a medidas de reacondicionamiento como las capas de refuerzo. También se hace necesaria la evaluación en el caso de problemas relativos al diseño, los materiales usados o las técnicas de construcción, los cuales introducen dudas o discrepancias sobre el comportamiento de la obra en proceso o terminada o pueden manifestarse en un deterioro rápido del pavimento.

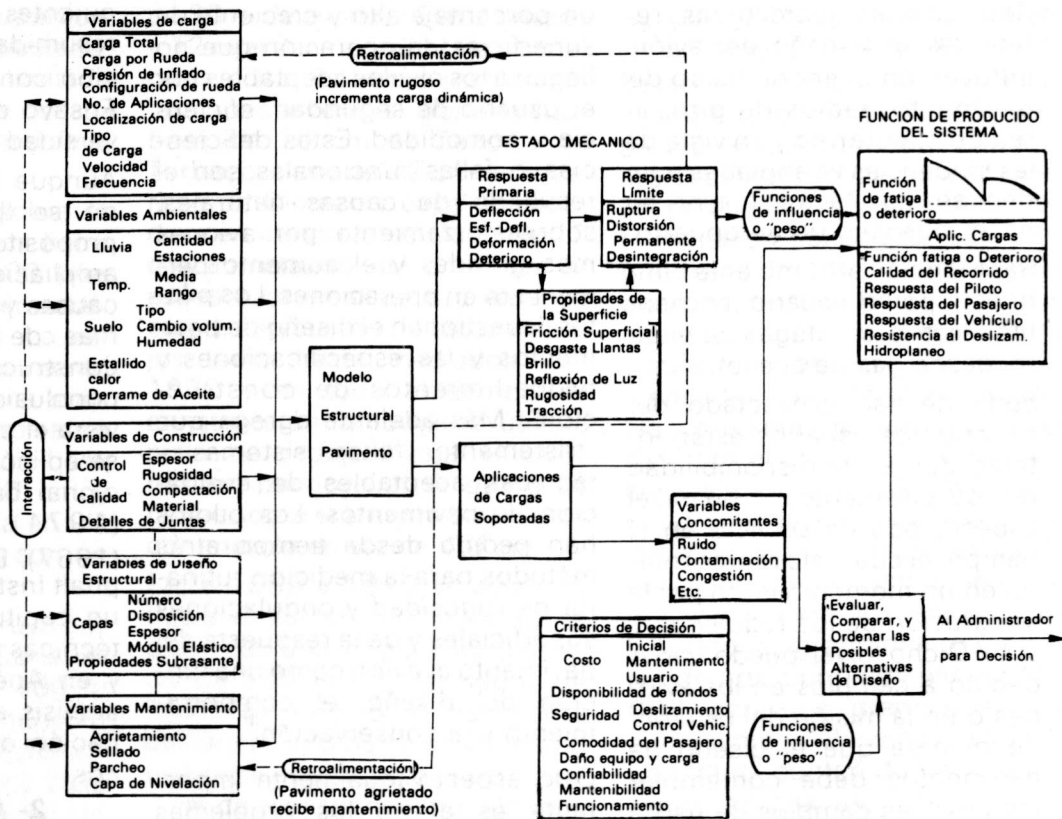
En este trabajo se hacen algunas consideraciones sobre la filosofía y métodos de evaluación, con una descripción breve de tres estudios de índole diferente, en aeropuertos colombianos, llevados a cabo por el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Instituto de Ensayos e Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional. A partir de una revisión de bibliografía reciente, se incluye una mención a sistemas y procedimientos nuevos, empleados o propuestos en otros países para el estudio de pavimentos ya construídos.

### 1- INTRODUCCION

Dentro de la infraestructura del medio de transporte aéreo ocupa

un lugar importante el pavimento de las pistas de despegue, carreteo, conexiones y plataformas; su estado debe permitir que se realicen con cierto grado de seguridad, economía, eficiencia y comodidad las operaciones terrestres y las de transición aire-tierra-aire, o sea, aterrizaje, decolaje, maniobras, carga, descarga y mantenimiento (Murphree et al, 1971). Los pavimentos de aeropuertos son sistemas estructurales complejos que abarcan muchas variables incluyendo diversas combinaciones de configuración geométrica, ambiente, construcción, materiales, cargas, mantenimiento, economía y comportamiento (Ver la Figura N° 1), como lo establecen Hudson y Kennedy (1973).

Las variables mencionadas deben tenerse en cuenta en los métodos de diseño de pavimentos nuevos y en los que se utilicen para ampliar, reforzar, rehabilitar o reemplazar los existentes de acuerdo con su nivel de servicio. Se requiere entonces contar con técnicas convenientes de evaluación que hagan posible decidir sobre las últimas actividades y desarrollar, comprobar o ajustar métodos de diseño. La evaluación es básica para planear el futuro y debe dar el estado del pavimento en cualquier momento (FAA, 1967); sus alcances deben ser lo suficientemente amplios para cubrir el balance económico avión-pavi-



mento-usuario (Murphree et al, 1971).

De acuerdo con estos autores, se espera que en 1985 el número de pasajeros-kilómetro/año haya crecido 5 veces en el mundo con respecto 1970 mientras que el tonelaje de carga podrá aumentar entre 10 y 20 veces el nivel que tenía en 1970. Las implicaciones de estas tendencias para el diseñador de pavimentos son las de tener aviones más grandes, más pesados y más numerosos. En efecto, puede pensarse que para 1985 la longitud de los aviones alcanzará los 100 m, su peso será mayor de 750 ton y transportarán más de 1500 pasajeros. Las cargas por rueda que hoy en día están cerca de las 40000 lbs, llegarán a las 60000 lbs. Debido al tamaño, peso y comportamiento de los nuevos aparatos, lógicamente aumentarán las exigencias sobre los pavimentos que los ingenieros civiles tendrán que diseñar, construir, operar y mantener en los próximos años. Es posible que cambie la importancia relativa de las diversas propiedades del pavimento, por ejemplo, la resistencia estructural puede pasar a ocupar un lugar secundario en el

diseño frente a la rugosidad de la pista, en vista de la restricción que ésta impone sobre el funcionamiento apropiado de los grandes aviones en las operaciones en tierra.

El precio de un avión, que hoy en día llega a los US \$ 30.000.000, es comparable con el de un pavimento para aeropuerto. La magnitud del costo total de mantenimiento del sistema de aterrizaje varía directamente con la rugosidad de la superficie del pavimento. Se ha estudiado un costo promedio de US \$ 1.000.000 por dicho concepto durante una vida útil del avión de 12 años. Al ampliar esto al número de aviones de una flota dada, puede comprenderse que el mantenimiento solamente es una cifra significativa. Hudson y Kennedy complementan estas ideas al decir que el costo verdadero de un pavimento debe incluir los costos provenientes de pavimentos pobres, tales como los de daños a la carga y a los sistemas electrónicos cuando los aviones modernos usan pistas de despegue y carreteo con superficies deterioradas.

El pavimento de un aeropuerto

tiene el propósito de servir al usuario (el avión, la empresa operadora, el piloto y los ocupantes) proporcionando una serie de condiciones requeridas por éste en función de sus necesidades reales y sus deseos. Ya el concepto de nivel de servicio (explicado por Lederman y García, 1976) refleja un intento de integrar las necesidades del usuario en los procesos de diseño y evaluación, pero se estima conveniente hablar en términos de los "requisitos funcionales". Murphree y sus colaboradores mencionan que en el caso de pavimentos para aeropuertos, los requisitos funcionales que se han desarrollado incluyen:

- 1- Soporte físico de los aviones durante su permanencia en tierra, capacidad de resistir cargas estáticas, dinámicas y de impacto.
- 2- Limitaciones de aceleración longitudinal (despegue y frenado), lateral (estabilidad direccional), vertical (rugosidad) y alrededor de los ejes longitudinal, transversal y vertical del avión.
- 3- Fisiológicas (visuales y auditivas) como las que utiliza el piloto en su tarea.

- 4- Restricciones geométricas, referentes al tamaño del avión. Influyen en el ancho físico del pavimento, radios de giro, área de plataforma y en vista de las tendencias ya anotadas pueden ser un factor mayor en hacer obsoleto un aeropuerto.
- 5- Resistencia al ambiente impuesto por el usuario (corrientes eléctricas, ráfagas de viento, descargas de aceite).
- 6- Perfil de uso proyectado del usuario; los usuarios están interesados en la disponibilidad de los pavimentos a un nivel especificado de servicio en el tiempo, el cual está representado en un momento dado por la integración de los requisitos 1 a 5. Dicho nivel puede variar debido a cambios en los aviones o en la misión del usuario, de manera que el diseño de pavimentos debe contemplar los posibles cambios de uso o de usuario.

Paralelamente a lo anterior se introduce en la evaluación el concepto de **falla funcional**, la cual ocurre cuando las condiciones del pavimento no pueden cumplir los requisitos funcionales a niveles tolerables de economía, seguridad, eficiencia y comodidad. En este contexto es diferente de la falla estructural del pavimento y es por lo tanto una expresión de las limitaciones en la calidad del servicio ofrecido al usuario, es decir que se expresa la falla en últimas desde el punto de vista de éste. La APA (Airline Pilots Association) relaciona falla funcional con seguridad aérea la cual está asociada con el crecimiento de riesgos para los pasajeros.

El punto de vista de los pilotos tiene indudable importancia en lo atinente a la evaluación de pavimentos. En Colombia es frecuente conocer sus opiniones por medio de artículos de prensa (Ver por ejemplo Calvo Ch., El Espectador, 1971). En el Congreso patrocinado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE, sobre el tema "Aeropuertos - Desafíos del Futuro", W. T. Alford (1973) expresaba que "hay

un porcentaje alto y creciente de superficies de operación que no llegan a los niveles aceptables por el usuario de seguridad, eficiencia y comodidad. Estas deficiencias o fallas funcionales son el resultado de causas naturales, sobreesforzamiento por aviones más grandes y el aumento permanente en operaciones. Los pilotos "cuestionan el diseño de pavimentos y las especificaciones y procedimientos de construcción". Más adelante agrega que "tristemente, faltan sistemas y técnicas aceptables de evaluación de pavimentos. Los pilotos han pedido desde tiempo atrás métodos para la medición rutinaria de rugosidad y ondulaciones superficiales y de la respuesta del pavimento al avión como una función del diseño, el comportamiento y la conservación".

Otro aspecto igualmente importante es el de los problemas relacionados con el mantenimiento. En algunos aeropuertos (prácticamente todos los nuestros) el cierre de una pista impone serias dificultades de operación, por lo tanto el diseñador debe balancear económicamente el costo del diseño inicial versus la frecuencia y magnitud del mantenimiento.

En Colombia se han llevado a cabo varios estudios de evaluación de pavimentos en aeropuertos, por medio de firmas consultoras, la Universidad o el Ministerio de Obras Públicas, pero muy poco se ha publicado sobre el particular. A. J. González y E. Sarria (1976) al tratar el tema de diseño y construcción de terraplenes tocan algunos puntos generales sobre el desarrollo de aeropuertos. F. Sánchez (1976) aunque no se refiere a aeropuertos, analiza los factores que afectan la fricción entre llanta y pavimento y describe el medidor portátil de resistencia al deslizamiento que posee el MOPT. G. Charry Lara (1977) describe detalladamente la aplicación de sistemas de evaluación y diseño de refuerzos para pavimentos rígidos en el Aeropuerto El Dorado. En los capítulos si-

guientes se presentan en forma resumida tres casos de evaluación confiados al Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional.

Aunque los casos mencionados no se llevaron a cabo con el propósito de planear refuerzos o ampliaciones (\*), sino para buscar causas y soluciones para problemas de comportamiento o de construcción, en sus análisis y conclusiones no se perdió de vista el primero. En su desarrollo se aplicó la metodología convencional basada en FAA, AC 150 (1971). Navdocks DM-21 (1967), Brown (1965) y The Asphalt Institute MS-11, (1963). En un capítulo final se recogen las técnicas modernas de evaluación y en Apéndices los métodos de análisis estructural y la determinación de los parámetros elásticos.

## 2- AEROPUERTO DE CARTAGENA CASO DE CARGA EXCESIVA

En marzo de 1971 el Departamento Administrativo de Aeronáutica Civil, solicitó al Instituto de Ensayos e Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, un concepto técnico sobre las posibles causas de las fallas presentadas en el pavimento asfáltico de la pista del Aeropuerto de Creso en Cartagena. Posteriormente la División de Ingeniería del Departamento, precisó al Laboratorio que se trataba especialmente de las fallas de una parte de la pista, comprendida entre el K 1+000, conexión con la plataforma, y el Caño de Juan Angola, en el K 1+500. El Instituto encargó del estudio al Ing. Manuel García López Jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) en ese entonces.

Según la inspección visual efectuada en desarrollo del estudio y la información preliminar recibida, el ancho de la pista era de 45 m con pavimento de concreto asfáltico y sobreanchos de 7.50 m a cada lado, en concreto asfáltico de menor espesor. Existían zonas de seguridad de 52.5 mts. de ancho, con una primera franja

imprimada y el resto de superficie de material granular compactado, con pendiente adecuada, limitada por canales en tierra que constituían el drenaje longitudinal de la pista.

Hasta 1964 se operó sobre la pista antigua comprendida entre el K 0+000 y el K 1+500 (Ver Figura 2), con un pavimento asfáltico terminado en 1960. La estructura total de este pavimento estaba constituida por una sub-base del material local zahorra, de 30 a 40 cm de espesor, una base de macadam de 8 a 10 cm y rodadura asfáltica mezcla en vía de 3 a 6 cm de espesor, con un promedio de 4 cm.

A partir de 1964 se construyó por una firma contratista de Cartagena una prolongación de 400 m hacia el sur del Caño, compuesto por una sub-base de 20 a 30 cm de espesor, de zahorra, una base de 10 a 20 cm de triturado y 5 cm de rodadura asfáltica tipo macadam de penetración. Esta parte de la pista fué reparada desde finales de 1968 siguiendo recomendaciones de una firma consultora de Bogotá; se reconstruyó una faja

de 30 m de ancho, 18 m al oriente y 12 m al occidente del eje central de la pista. Se buscó reemplazar las capas anteriores por una sub-base de 20 cm de Zahorra de Turbaco, base de 10 cm de triturado de Cimaco y capa de rodadura en concreto asfáltico de 12 cm aumetando así en 7 cm el espesor original de rodadura (5 cm). La ejecución de estos trabajos tomó hasta mediados de 1970 y en todo el tiempo de construcción la longitud útil de pista se redujo hasta el caño mismo, por lo cual se operó de nuevo sobre el antiguo pavimento con mezcla en vía de 4.0 cm.

Entre 1969 y 1970 se adicionó hacia el sur un nuevo tramo de pista, con una longitud aproximada de 350 m y a mediados de 1970 se reforzó el pavimento desde el Caño hacia el Norte con una capa de concreto asfáltico de 7 cm de espesor mínimo. Algunos trabajos de reparación o refuerzo han sido efectuados directamente por la Aeronáutica, otros por medio de firmas contratistas.

Preocupaba a la Aeronáutica la existencia de grietas longitudina-

les a ambos lados del eje central, en la Zona 2, Fig. 2. El L.E.M. desarrolló un programa de investigación que comprendía la inspección visual general de la pista, drenajes y desagües, observación de pendientes transversales, determinación del tipo de falla, longitud y ancho de las grietas y su posición relativa en la pista. Se incluyó además la ejecución de sondeos o apiques en por lo menos tres secciones transversales convenientemente localizadas, con el propósito de establecer los espesores del pavimento, determinar en el sitio las humedades y densidades de bases y sub-bases y tomar muestras de todas las capas para los ensayos de laboratorio, granulometría, Límites de Atterberg, compactación y CBR para los granulares y la subrasante, y densidad, estabilidad, flujo, contenido de asfalto y granulometría de agregados en las mezclas asfálticas.

La realización del programa estuvo condicionada por la operación del Aeropuerto, ya que no se podía interrumpir su funcionamiento normal. Esta última medi-

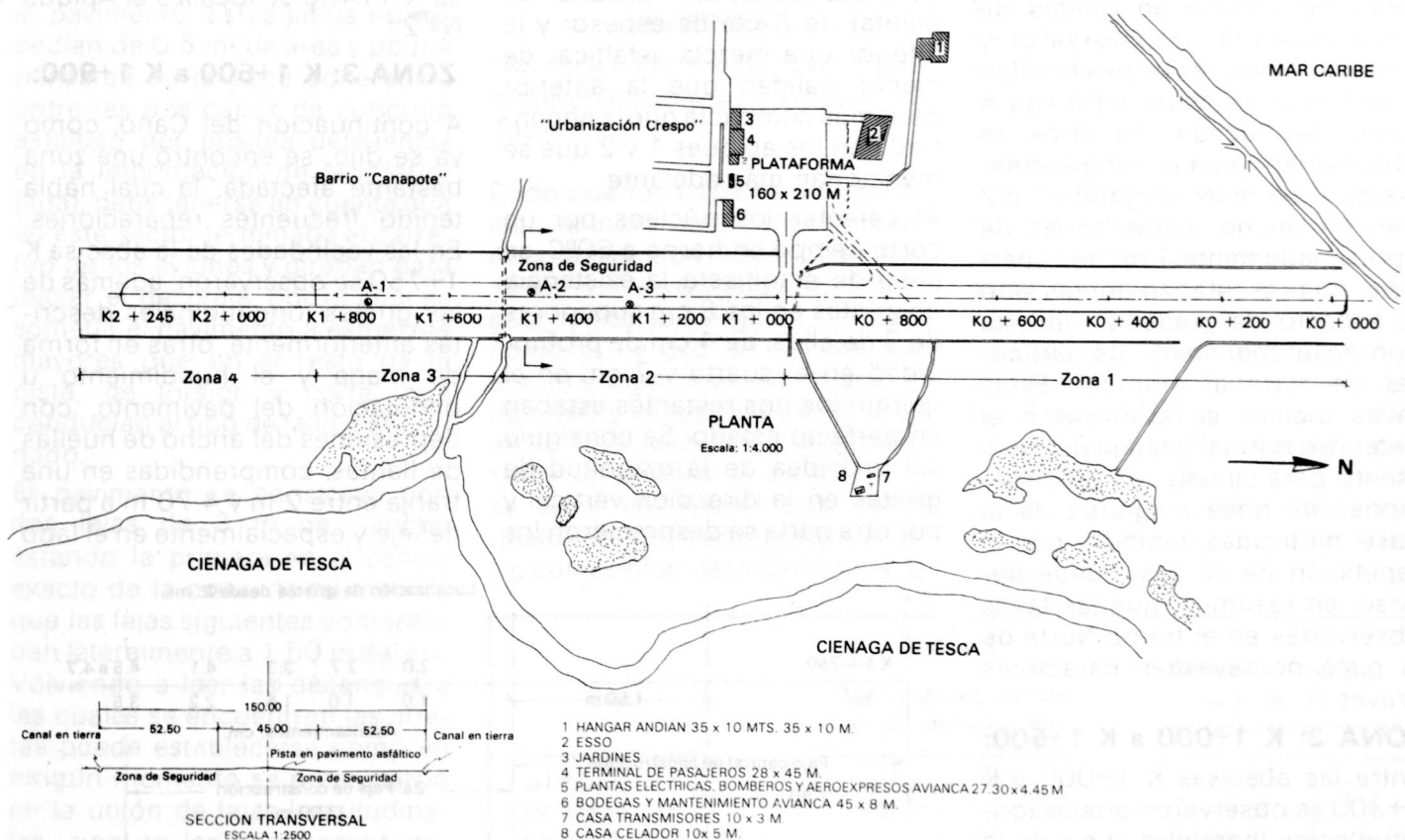


FIGURA 2.

da era por otra parte, indeseable dado que según artículos de periódicos bogotanos de la época (Ver Ch. Calvo, 1971), Cartagena era particularmente sensible a cuanto tuviera relación con el Aeropuerto. Por esta razón se trabajó en los apiques entre 1 y 5 a.m. durante varios días.

Posteriormente se llevaron a cabo entrevistas con las firmas de Ingeniería de Consulta y Contratistas relacionadas con los trabajos efectuados desde 1968, con el objeto de conocer las especificaciones de diseño (espesores y materiales) y las operaciones de construcción. Finalmente se hizo el análisis de toda la información obtenida en las etapas anteriores para establecer conclusiones y elaborar el informe correspondiente. Por facilidad de trabajo se separaron los resultados de la inspección en cuatro zonas indicadas en la Figura N° 2.

**ZONA 1: K 0+000 a K 1+000:**

Presentaba fallas incipientes en la capa de rodadura localizadas a distancias longitudinales que fluctuaban entre 10 y 40 m y dentro de una franja de 4 m a cada lado del eje. En algunos sitios se apreciaban grietas de poca longitud, transversales y longitudinales, las cuales tendían a una configuración de mapa o cuero de caimán; en otros se observaban grietas longitudinales de 1 a 3 m de longitud y 1 ó 2 mm de ancho. Otras zonas de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> de superficie, no presentaban grietas sino el aspecto de gradación abierta con desprendimiento de partículas de material granular. Estas fallas locales se atribuyeron al deterioro normal o fatiga del pavimento para su uso, o a deformaciones de poca magnitud de la base motivadas también por la repetición de cargas. Puede decirse, en resumen, que las fallas observadas en el tramo Norte de la pista no revestían caracteres graves.

**ZONA 2: K 1+000 a K 1+500:**

Entre las abscisas K 1+000 y K 1+300 se observaron grietas longitudinales (paralelas al eje de la pista) algunas continuas en todo

el tramo, otras de longitud menor, a ambos lados del eje, pero en mayor número al lado oriental. Estas grietas aparecían en una faja de 4 m de ancho máximo a ambos lados del eje; sin embargo, el mayor número estaba localizado entre los 2 y los 3.50 mts. a partir del eje. Algunas grietas entre los 2,50 y 3,50 mts. tenían un ancho máximo de 0.5 cm en longitudes de 5 a 10 cm; en su mayor parte el ancho de las grietas era de 0.2 cm. en la superficie. En algunos sitios se habían formado grietas transversales de 10 cm de longitud sin conformar mapa.

En la abscisa K 1+280 se localizó una sección transversal de análisis, en la cual se hizo el Apique N° 3 a 2,50 m al oriente del eje. Dada la dificultad que presentó el pavimento a la excavación a mano (con barra y pica) se resolvió tomar un buen número de núcleos de 4" de diámetro, logrando así el área necesaria para el apique. Por este motivo se obtuvieron 7 núcleos, algunos compuestos de dos capas asfálticas con espesor total promedio de 12.8 cm siendo la superior un concreto asfáltico (mezcla en planta) de 8 cm de espesor y la inferior una mezcla asfáltica de menor calidad que la anterior pero más compacta que la encontrada en los apiques 1 y 2 que se mencionan más adelante.

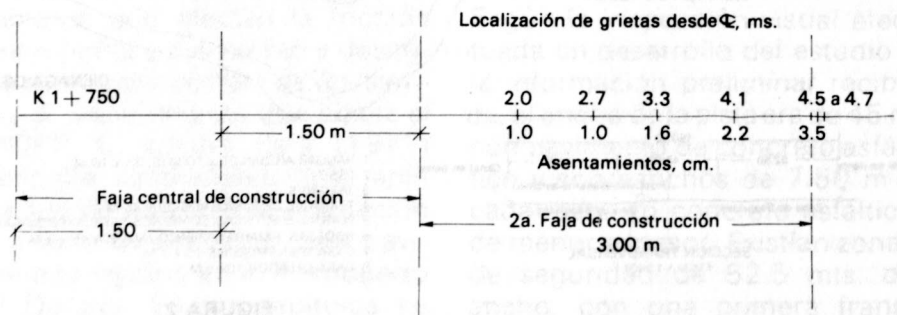
Al calentar los núcleos por un corto tiempo en horno a 60°C, se puso de manifiesto la existencia de grietas en los 8 cm superiores de 3 de ellos, de 4 cm de profundidad en el cuarto y 2 cm en el quinto; los dos restantes estaban en perfecto estado. Se consiguió así una idea de la magnitud de grietas en la dirección vertical y por otra parte se despreciaron los

valores de Estabilidad y Flujo obtenidos en los núcleos agrietados.

Del K 1+300 al 1+450 las grietas estaban localizadas a distancias entre 1,90 y 3,50 m del eje y en general eran continuación de las mencionadas antes y de las mismas características. Se notaba a unos 25 m del Caño de Juan Angola una discontinuidad en el pavimento a todo lo ancho de la pista pero de mayor magnitud en el lado oeste, la cual, según datos suministrados posteriormente por los consultores, se debía a la construcción de una zanja para el paso de líneas eléctricas. En las cercanías del caño las fallas eran mayores, especialmente al sur de éste, observándose algunos parcheos de superficie aproximada de 1x2 a 3 m en el sentido longitudinal. Se advirtió entonces la influencia desfavorable del caño en las características o comportamiento del pavimento, opinión compartida por los contratistas quienes informaron de la presencia de suelo de subrasante con abundante contenido de materia orgánica y del carácter problemático del sector. En la abscisa K 1+450 se localizó el Apique N° 2.

**ZONA 3: K 1+500 a K 1+900:**

A continuación del Caño, como ya se dijo, se encontró una zona bastante afectada, la cual había tenido frecuentes reparaciones. En las vecindades de la abscisa K 1+750 se observaron, además de las grietas longitudinales descritas anteriormente, otras en forma de mapa y el hundimiento u ondulación del pavimento, con depresiones del ancho de huellas de llantas, comprendidas en una franja entre 2 m y 4.70 m a partir del eje y especialmente en el lado



oriental. Por considerar este sector como el más afectado se ejecutó en la abscisa 1+750 el Apique N<sup>o</sup> 1 y se determinaron tanto las distancias a las cuales se encontraban las grietas, como los asentamientos, información que se presenta en el esquema anterior. Las grietas en las crestas de la ondulación alcanzaban un ancho de 1 cm.

#### ZONA 4: K 1+900 a K 2+245:

Entre estas abscisas se registraron algunas grietas longitudinales en sitios aislados; había zonas de 1 m<sup>2</sup> de superficie como máximo, de gradación muy abierta o insuficiente asfalto y desprendimiento de material granular, aunque informaciones posteriores indicaron que se colocó el agregado grueso en la superficie para aumentar la rugosidad de ésta, disminuyendo así la posibilidad de deslizamiento de las llantas.

En algunos puntos de la cabecera de la pista (K 2+180 y K 2+210) se notó corrimiento de la capa superior del concreto asfáltico sobre la inferior, de manera que en uno o dos sitios se podía levantar y desprender fácilmente el pavimento. Estos sitios no excedían de 0.5 m<sup>2</sup> de área y podría pensarse en la poca adherencia entre las dos capas de concreto asfáltico por posible deficiencia en la imprimación de la inferior (liga); debe tenerse en cuenta que en este sector terminaba el carreteo de los aviones y giraban para iniciar el descolaje, por lo cual se sometía el pavimento a esfuerzos mayores que en el resto de la pista, de torsión y corte, que conducían al tipo de falla mencionado.

El pavimento se construyó con dos fajas de 3 m de ancho estando la primera en el centro exacto de la pista, de tal manera que las fajas siguientes comenzaban lateralmente a 1.50 m del eje. Volviendo a leer las distancias a las cuales se encuentran las grietas puede establecerse cómo en ningún momento se presentaron en la unión de fajas longitudinales, sino en las fajas inmediatamente vecinas a la central.

Capas y materiales	Espesores, cm.	
	Apique 1	Apiques 2 y
Rodadura, concreto asfáltico:	6	8
Pavimento antiguo, mezcla asfáltica pobre con grava redondeada suelta ("china"):	4	5
Base granular, triturado con zahorra:	15	5
Sub-base de zahorra	35	22
TOTAL:	60 cm	40 cm

En relación con el drenaje general de la pista, se anota que las pendientes transversales y longitudinales eran a simple vista apropiadas. Se observó un buen drenaje superficial durante las lluvias que ocurrieron en el tiempo que duró la exploración; a cada lado de la pista se encontraron canales o zanjas de desague en buen estado y en servicio adecuado en la mayor parte de su longitud. El mantenimiento se consideró aceptable, se observó diligencia en cuanto a parcheo y limpieza de la pista; en todas las zonas agrietadas se había aplicado una capa superficial de asfalto para impermeabilizar grietas y evitar entrada del agua a las capas inferiores del pavimento.

#### CONSIDERACIONES SOBRE ESPESORES DEL PAVIMENTO Y LA OPERACION DE AVIONES:

Las excavaciones realizadas permitieron establecer los datos de la Tabla 1.

Dado que los trabajos de reparación al norte del Caño de Juan Angola tomaron desde finales de 1968 hasta mediados del 70, lo cual limitó la longitud de pista como ya se dijo, se deduce que durante algo más de 1 año el carreteo y el descolaje se hicieron en lo que respecta a la Zona 2 sobre un pavimento de 40 cm; si se tiene en cuenta que desde finales de 1967 comenzó el servicio con aviones Jet a Cartagena, la

Zona 2 entre el carreteo y Juan Angola estuvo sometida a fatiga excesiva. Entre los aviones que servían a Cartagena con más frecuencia en la época del estudio, imponían las cargas mayores los Jet Boeing 727 y 737 y el Lockheed 188A & C (Electra), operados por compañías nacionales. Por considerarlo de gran interés para este estudio se transcriben en la Tabla 2 algunos datos sobre dichos aviones, tomados de la Ref. (Ver también la Figura N<sup>o</sup> 6).

Puede considerarse como crítico el Avión Jet 727 el cual tenía generalmente como ruta más larga la de Bogotá-Cartagena por lo cual se operaba con un peso de descolaje de 136000 lbs. En el diseño de pavimento de la pista, los Consultores que comenzaron a actuar desde 1967 usaron los manuales de la Federal Aviation Administration (FAA); para los trabajos comprendidos entre finales de 1967 y mediados de 1970 debió emplearse el Manual AC 150/5320-6A, "Airport Paving", (May 9, 1967), al cual se introdujo un cambio en 1968 relativo especialmente a pavimentos rígidos. El diseño de espesores para una carga total de 140000 lbs. y una subrasante tipo F-4, según la Fig. 7 del manual es: espesor total 56 cm (22 pulg), compuesto de rodadura bituminosa de 10 cm (4 pulg), capa de base mínima 23 cm (9 pulg) y subbase 23 cm (9 pulg).

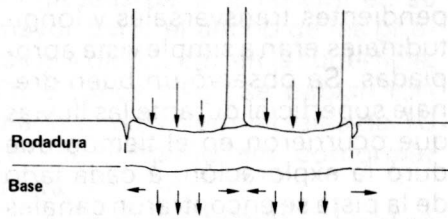
Avión	Peso máximo teórico en el descolaje, lbs.	Distancia (D) entre centros de ejes del tren principal.
Jet Boeing 727	153000 a 170000	18' 9" = 5.72 m
Jet Boeing 737	93000 a 108000	17' 2" = 5.23 m
Lockheed 188 A & C	116000	31' 2" = 9.50 m
Douglas DC-4	73000	24' 8" = 7.52 m

En las condiciones anotadas el espesor total de la reparación efectuada en el tramo de 400 m al sur del Caño de Juan Angola era correcto, según lo encontrado en el Apique 1 y para las normas de diseño de 1967 ya indicadas. Se tendría una capa de base inferior a los 23 cm compensada por una subbase de 35 cm de buenas condiciones. En lo que respecta a la Zona 2, objeto principal del estudio, se podía comparar el perfil promedio existente (Apiques 2 y 3) con el diseño anterior, deduciéndose que el espesor total era inferior en casi 20 cm al requerido para las cargas que se imponían al pavimento en esa época. Al pensar que antes de colocar el refuerzo de concreto asfáltico (1970) se operó para Carreteo y despegue en este tramo sobre un pavimento de menores especificaciones, puede explicarse el deterioro que se observó en los apiques en las capas de rodadura (mezcla en vía) y base terminadas en 1960. Incluyendo el refuerzo de concreto asfáltico de espesor mínimo 7 cm, también se está por debajo de lo requerido en el diseño.

A partir de estas consideraciones se planteó una hipótesis de falla en la siguiente forma: al producirse el paso del avión la carga que aplicaba al través del tren principal (93% de la total) era excesiva para el espesor existente, transmitiéndose esfuerzos muy altos a las capas inferiores, que aunque no produjeran falla por corte en ellas (las grietas se encontraron solamente en la capa de rodadura) causaban deformaciones verticales o asentamientos locales bajo la llanta. En esto podía tener gran participación el desplazamiento o reacomodación de partículas de grava ("china") sueltas en la capa pobre bajo el concreto asfáltico.

A una distancia muy corta del borde de la llanta hacia afuera la base no se deflecta. La deformación instantánea que se induce en la capa de rodadura puede ser excesiva, aún tratándose de un pavimento flexible, y se produce falla por corte sobre planos verti-

cales tal como se indica en el esquema. Las deformaciones de la base son hasta cierto punto recuperables elásticamente existiendo una deformación remanente que aumenta con el tiempo (repetición de cargas) dando permanencia a la grieta de la capa superior, la cual se irá profundizando y extendiendo longitudinalmente.



La localización de las grietas era otro punto importante. Se dijo antes que las grietas se encontraban en una franja comprendida entre los 2 y los 3.50 mts. desde el eje, a ambos lados de éste. Por otra parte, una característica del uso de las pistas de aeropuertos es la alta canalización del tráfico, ya que se recorre con mayor frecuencia el centro de la pista, lo cual ocurre con más precisión durante el carreteo. Revisando las características de aviones puede observarse que los pares de llantas del tren principal de los aviones incluidos recorren el pavimento a distancias de 2.86 m, 2.61 m, 4.75 y 3.76 m respectivamente, a cada lado del eje, cuando el avión va por el centro de la pista. En esta forma, los Jet 727 y 737 son los que ocupan la zona afectada por grietas; podría pensarse en la influencia de las cargas impuestas por la Lockheed para fallas a distancias del orden de 4.50 m a los lados del eje.

### Conclusiones del estudio

Se concluyó que las fallas presentadas en la pista del Aeropuerto de Crespo, especialmente en la zona comprendida entre el Carreteo (conexión con Plataforma) y el Caño de Juan Angola se debían al espesor insuficiente del pavimento para las cargas impuestas por los aviones de la época del estudio. Dichas cargas producían deformaciones verticales de la base que causaban falla por corte longitudinal del concreto asfáltico. Como agente principal en la falla

se señaló el avión tipo Jet Boeing 727. Los espesores encontrados del Caño de Juan Angola hacia el Norte eran inferiores a los requeridos por las normas de diseño FAA de 1967 para cargas similares a las del avión mencionado.

El tramo de pista del Caño hacia el Sur (400 m) de reparación posterior a 1967, cumplía con el espesor total requerido por las normas de ese año y por consiguiente se descartaba cualquier posibilidad de deficiencia en el diseño. Las operaciones de construcción evaluadas (posteriores a 1968) se consideraron satisfactorias en cuanto a calidad de materiales y cumplimiento de especificaciones de diseño. Las fallas en la zona estudiada no podían adjudicarse a defectos de construcción o mala calidad de materiales.

Finalmente se destacó que los diseños efectuados según sistemas anteriores a 1970 podían ser insuficientes después de este año. En efecto, la FAA en un cambio introducido al manual "Airport Paving" después del 2 de febrero de 1970, como consecuencia de investigaciones realizadas en 62 aeropuertos importantes de los EE.UU., recomendó un aumento de espesores de diseño o de refuerzo en Aeropuertos donde operaran aviones de más de 110.000 lb. sobre rueda doble en eje simple, y mayores de 200.000 lbs. sobre rueda doble en tandem. Entre los aviones considerados como críticos se incluyeron los Jet 707 y 727 y se estableció como carga crítica de diseño para los aeropuertos que sirvieran dichos aviones la de 350.000 lbs. Este factor aisladamente lleva a un aumento en los espesores totales; sin embargo la FAA recomendaba aumentar el espesor de la capa de rodadura en 1", y adicionar incrementos del 10% en bases y sub-bases para decolajes equivalentes a la carga crítica entre 1200 y 3000 anuales, lo cual podía ser el caso de Cartagena. En resumen, para asegurar un buen comportamiento de la pista de Crespo se recomendaba una capa de refuerzo, que dentro de las condiciones econó-

micas permitiera acercarse a los espesores exigidos por las cargas del presente.

### 3- Aeropuerto de Armenia Un caso de ensayos de control

En octubre de 1971 el Departamento Administrativo de Aeronáutica Civil, solicitó al Instituto de Ensayos e Investigación, la evaluación técnica del pavimento asfáltico de la pista del Aeropuerto "El Edén" de Armenia, para rendir un concepto sobre el cumplimiento de las Especificaciones Técnicas establecidas en los pliegos de licitación para dicho pavimento. Se indicó además la existencia de una discrepancia entre resultados de ensayos de estabilidad realizados por la Interventoría Directa de la Aeronáutica Civil, y otros realizados por una interventoría anterior, aceptados por los Contratistas de la obra.

El estudio fué encomendado a los lngs. Manuel García López y Lisandro Beltrán M., Jefe e Ingeniero del Laboratorio de Ensayo de Materiales respectivamente. Incluyó: (a) la revisión general de toda la documentación técnica relacionada con la interventoría y construcción del pavimento; (b) un análisis de información sobre trabajos similares realizados con los mismos materiales por los Contratistas, con el propósito de establecer las características y comportamiento de los agregados empleados; (c) la inspección visual del pavimento terminado en la pista del Aeropuerto, de las fuentes de materiales y de las plantas de mezcla asfáltica de los Contratistas; (d) toma de núcleos del pavimento y muestras de mezcla en planta y agregados en la fuente, las cuales fueron sometidas a ensayos, una parte en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de Universidad del Quindío y la restante en el Laboratorio de Ensayo de Materiales en Bogotá. Finalmente se hizo un análisis de los resultados obtenidos en las etapas anteriores (abarcando los ensayos de laboratorio efectuados por la Interventoría), con el objeto de establecer las conclusiones del estudio. Para llevar a cabo esto último, se solicitaron

algunos conceptos y orientaciones al Ing. Pablo Lederman, Profesor de Pavimentos de la Facultad de Ingeniería.

Inicialmente el contrato contemplaba la construcción de una base de concreto asfáltico de 1" de espesor, y posteriormente (hacia junio/71) se cambió a dos capas de pavimento asfáltico de 1 1/2" de espesor cada una, construídos de acuerdo con la especificación: "Pavimento Asfáltico": se regirá según la Norma MOP C-352-64 tipo A Mezcla V. La porción de asfalto por agregado será de 6,0 a 8,5 kilos por 100 kilos de agregado". En la documentación estudiada no se encontró alguna especificación más precisa y detallada para la construcción de las dos capas, pero la Interventoría de la Aeronáutica informó que se había fijado la gradación Tipo A-IV de dicha Norma para la base asfáltica y la A-V para la capa de rodadura, con porcentajes de asfalto 85-100 de 6 a 8% y de 6 a 8,5% respectivamente.

Se pudo establecer que no se realizó oportunamente un diseño completo de las mezclas asfálticas por Método Marshall, condición necesarísima para trabajos de pavimentación, especialmente en los del tipo bajo estudio. Con el diseño Marshall se hubieran definido las condiciones de estabilidad, densidad, flujo y vacíos de las mezclas asfálticas con los cuales controlar más exactamente la calidad del pavimento; pero ante todo, se hubiera fijado un porcentaje óptimo de asfalto de diseño, ya que la Norma MOP adoptada sólo proporciona valores usuales entre los cuales puede estar el diseño. La práctica en el diseño de mezclas presenta numerosos casos en los cuales el porcentaje óptimo de asfalto puede ser inferior al mínimo de la Norma (6%) o superior al valor máximo 8,5%, según las condiciones particulares de gradación y tipo de agregados. En estas circunstancias, no existía un valor preciso del porcentaje de asfalto o de la densidad de la mezcla con los cuales comparar los resultados que se obtuvieran en núcleos

del pavimento y en cuanto a la última, debería tomarse como referencia el promedio de las densidades de briquetas compactadas en planta o en vía.

No obstante, en relación con lo anterior, se encontró una comunicación del Ingeniero residente de interventoría a los contratistas, en la cual se estableció para briquetas de la mezcla asfáltica preparadas con 75 golpes/cara, una estabilidad mínima de 1500 lbs, flujo entre 8 y 16 centésimas de pulgada, vacíos en la mezcla 3 a 5% y vacíos llenos con asfalto 70 a 80%. Fijaba como espesor compacto del concreto asfáltico 3,75 cm.

Con respecto a la gradación de los agregados la interventoría cambió las especificaciones tipo A-IV y V del contrato, por los datos a continuación:

Tamiz	Capa inferior % pasa	Capa superior % pasa
1"	100	
3/4"	82-100	100
1/2"	70-90	82-100
3/8"	60-82	68-90
N. 4	42-70	50-79
N. 10	30-60	36-67
N. 40	15-40	17-44
N. 80	8-26	9-29
N. 200	3-8	3-8

A partir de julio 14/71 el Departamento de Aeronáutica asumió directamente la Interventoría de la obra y se establecieron las siguientes especificaciones para la mezcla asfáltica: Estabilidad corregida mínima: 1200 lbs., flujo de 8-16 (0.01") y densidad de la mezcla compactada 95% min, (respecto a las briquetas compactadas de Laboratorio).

En el estudio se tomaron estos valores como referencia para la evaluación de mezcla asfáltica y se compararon los resultados de granulometría con las gradaciones ya mencionadas.

La interventoría inicial ordenó una serie de ensayos sobre briquetas de la mezcla extendida en la pista con los siguientes resultados:



a) Laboratorio de la S.O.P. de Bogotá, junio 28-30/71: Tres briquetas (Tabla 4).

b) Laboratorio de la Universidad del Quindío, junio 30/71: 6 Briquetas, (4,1) a 5,3% de Asfalto (Prom. 4.65%); Flujo 10 a 17 (Prom. 12.5); Estabilidad: 1040 a 2050 lbs. (Prom. 1575 lbs.).

En julio/71, la Interventoría del Fondo Aeronáutico Nacional realizó en la U. del Quindío nueva serie de ensayos sobre 11 briquetas compactadas: (Tabla 5).

Entre agosto y septiembre la Interventoría obtuvo corazones del pavimento utilizando equipo recién adquirido por el FAN. En el laboratorio de la Universidad del Quindío (Sep. 17/71) se efectuaron las pruebas de **19 núcleos de 37** tomados, con los resultados de la Tabla 6.

Salta a la vista la reducción importantes en la estabilidad, al comparar los valores obtenidos anteriormente. Esto motivó discrepancias Interventoría-Contratista y llevó a la necesidad del estudio solicitado al IEL. Al tener conocimiento de estos valores antes de la visita al aeropuerto, se esperaba encontrar un pavimento con superficie muy débil, fácilmente disgregable, aún con la aplicación del tacón del zapato (prueba que se atribuye jocosamente a los grandes expertos y les permite dar con bastante precisión las propiedades de una capa asfáltica), y con marcas del paso de vehículos. Sin embargo la inspección inicial dió otra impresión por lo cual los ingenieros del LEM procedieron a ensayar parte de los corazones restantes (de los 37 ya mencionados) y a ordenar la toma de otros empleando la broca disponible en el aeropuerto, así como a compactar algunas briquetas de la mezcla extendida en la pista. Se obtuvieron los siguientes resultados de la Tabla 7.

	Densidad gr/cm <sup>3</sup>		Estabilidad corregida, lbs.		Flujo 0,01"		% Asfalto		
Mínimo	2.359		1545		15		3,9		
Máximo	2.399		1693		17		4,1		
Promedio	2.375		1640		16				
Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N. 4	8	40	80	200
% Pasa	95,9	88,4	71,3	62,2	52,2	45,2	24,8	6,3	2,1

	Temperatura °C	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Estabilidad correg. lbs.	Flujo 0,01"	% Asfalto					
Mínimo	90	2,288	1178	9	4,9					
Máximo	130	2,385	1934	12	7,3					
Promedio	115	2,335	1676	10,5	5,9					
Granulometría (promedio de tres muestras):										
Tamiz:	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N. 4	10	40	100	200
% Pasa	100,0	96,0	90,9	82,9	77,1	66,3	57,6	33,0	8,4	5,1

	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Estabilidad correg. lbs.	Flujo 0,01"	Indice de compactación, %
Mínimo	2,085	114	16	91,7
Máximo	2,287	884	23	97,9
Promedio	2,203	346	20	94,3

a) Núcleos	Diámetro, cm	Espesor, cm (*)	Estabilidad, lb	Flujo (0.01")
Mínimo	9.23	6.10	178	18
Máximo	9.30	7.05	381	30
Promedio	9.28	6.61	274	26
b) Briquetas				
N. 1	10.21	5.98	1395	12
2	10.20	6.17	1371	11

(\*) NOTA: Los núcleos se ensayaron sin separar las dos capas.

Al realizar estos ensayos en el laboratorio de la Universidad del Quindío, con la natural extrañeza por unos resultados que parecían ilógicos, se evidenció que las dos partes del anillo de estabilidad Marshall no abrazaban las briquetas completamente, de manera que la carga se aplicaba a un área menor que la estandarizada. Se comprobó rápidamente que las partes del aparato estaban correctas por lo cual se fijó la

atención en el diámetro de las briquetas, midiendo valores cercanos a 3,5 pulgadas en lugar de las 4,0 convencionales en todas las muestras almacenadas en el laboratorio. Como prueba inmediata del efecto del menor diámetro se determinó la estabilidad a otros 10 corazones colocando alrededor de ellos unas fajas de cartón ordinario de 1/8" de espesor, con los resultados que se presentan a continuación:

Con cartones	Diámetro cm	Espesor total, cm	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Estabilidad correg. lbs	Flujo 0,01"
Mínimo	9.32	6.063	2,247	367	16
Máximo	9.40	7.683	3,320	1009	29
Promedio	9.35	6,734	2,287	662	23

Los resultados anteriores son concluyentes por sí solos. Se procedió entonces a revisar la broca utilizada y se estableció que tenía un diámetro exterior de 4 pulg. razón que explicaba el diámetro menor de los núcleos (igual al interior de la broca). Se solicitó al LEM el envío desde Bogotá de una broca de 4 1/4" de diámetro exterior, con la cual se tomó una nueva serie de corazones cuyos ensayos arrojaron los resultados de la Tabla 9 (6 muestras):

Sorpresivamente estos valores fueron también muy bajos, aunque algo superiores a los obtenidos en los núcleos de 3,5 pulgadas.

Al continuar la investigación en Bogotá, el Ing. Pablo Lederman hizo notar que el procedimiento de ensayo era incorrecto puesto que se estaban probando corazones compuestos de dos capas de diferente constitución (granulometría y posiblemente porcentaje de asfalto diferentes). En consecuencia se separaron base y rodadura insertando entre ellas una espátula caliente; se aplicaron los factores de correlación correspondientes al menor espesor (1 1/2 pulg. (Tabla 10).

Como conclusión, se estableció que los únicos valores confiables de estabilidad eran estos últimos, los cuales, con el propósito de evaluación, estaban entre el 70 y el 80% del mínimo permitido (1200 lbs). El flujo cumplía con especificaciones y la densidad era aceptable pues la gran mayoría de valores fué superior a 2,218 gr/cm<sup>3</sup>, 95% del requisito 2,335 gr/cm<sup>3</sup>. En cuanto a granulometría de agregados se encontró un ligero exceso de tamaños gruesos y algo de deficiencia en finos (pasa T80 y 200), hecho que explicaba una apariencia de gradación abierta que se había observado en la inspección visual del pavimento. El porcentaje promedio de asfalto fue de 5.35%, con mínimo de 4,45% y máximo de 7,42%; en general contenidos inferiores a los fijados en los pliegos (6 a 8 u 8,5%) pero que podrían ser los correctos para la gradación y tipo de agregados

TABLA 9.

	Diámetro cm	Espesor total, cm	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Estabilidad correg. lbs	Flujo 0.01"
Mínimo	9.90	4.742	2.224	279	11
Máximo	10.08	7.448	2.276	610	20
Promedio	9.98	6.434	2.247	447	16

TABLA 10.

BASE	Diámetro cm	Espesor cm	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Estabilidad correg. lbs	Flujo 0.01"
Mínimo	9.92	2.89	2.261	578	8
Máximo	10.02	3.83	2.367	1168	17
Promedio	9.99	3.53	2.314	815	11
RODADURA					
Mínimo	9.92	2.98	2.190	637	11
Máximo	10.02	3.96	2.256	1050	15
Promedio	9.99	3.30	2.233	899	13

usados, dependiendo del ensayo Marshall. Este no se realizó inicialmente como ya se dijo, pero la Interventoría ordenó un diseño por este método para el último tramo de la pista (octubre 71) cuyo contenido óptimo resultó de 5,2%, lo cual confirma la apreciación anterior.

Hoy en día podría adicionarse una reflexión sobre la conveniencia de construir un pavimento asfáltico en dos capas tan delgadas; un efecto posible es la pérdida rápida de temperatura en el espesor total de cada una, lo cual conduce a la obtención de densidades y estabilidades menores que las deseables (Ver por ejemplo Keufen, 1971).

#### 4- AEROPUERTO DE PASTO UN CASO DE REACCION AGREGADOS AL AGUA

El 2 de mayo de 1972 El DAAC solicitó al IEL la ejecución de una investigación con el fin de establecer las causas de "una gran infiltración de agua lluvia a través de las capas del pavimento, observada en la pista del Aeropuerto de Pasto, Departamento de Nariño, así como los efectos sobre la estabilidad del pavimento y sugerencia de las medidas correctivas". El trabajo fue encomendado al Ing. Manuel García López, Jefe del L.E.M. en ese entonces, y se llevó a cabo en forma similar a las dos anteriores. Dió origen a un extenso informe, el cual fue cita-

do y comentado por G. Saa Navia (1976) quien da informaciones sobre diseño y la construcción y analiza diversas incidencias del estudio y empleo de los agregados obtenidos en la región. En este capítulo se hará hincapié en la investigación de laboratorio realizada.

El pavimento de la pista se construyó entre noviembre de 1969 y diciembre de 1970. En el estudio inicial se mencionó que los agregados provenían esencialmente de la roca ígnea andesita los cuales "son ricos en caolines lo que produce un fenómeno de deshidratación en el suelo que no le permite compactar en su humedad óptima". Durante la construcción de las capas asfálticas se presentaron problemas relacionados con exceso o aparición de humedad, manifestados como pérdida de finos y saturación de la base granular, filtraciones y manchas blancas con agua libre en la capa de rodadura, entre ésta y la base asfáltica y en el contacto de ésta con la base granular. En los cuatro últimos meses de 1970, cuando se hizo la rodadura, se trabajó en condiciones de alta pluviosidad lo cual ocasionó varios problemas de colocación y compactación de mezclas asfálticas. El diseño estableció subbase granular de 30 cm, base granular de 19 cm, y rodadura de concreto asfáltico de 3,75 cm cada una.

El Aeropuerto está situado en una región de gran belleza natural, en la meseta de El Cano, flanqueada al Occidente por el Río Pasto en un cañón profundo y al sur por las estribaciones del Galeras. La pista tiene 2.200 mts. de longitud, con plataforma e instalaciones sobre el costado oriental localizada aproximadamente entre las Abscisas K 0 + 900 al K 1 + 1240. Se efectuó una inspección detallada de la pista, acompañada de toma de muestras y de algunos ensayos en el sitio. La visita se realizó durante los días 24 a 28 de junio/72 en época de verano y vientos; el último aguacero había ocurrido hacia el 20 del mismo mes, tuvo una duración de 3 hrs. y poca intensidad según informes recogidos en el sitio. En los días mencionados sólo se registraron ligeras lloviznas de corta duración, en dos ocasiones. Se observó que el Aeropuerto tenía un número pequeño de operaciones diarias, lo cual era característico como se deduce de la información de la Tabla N° 11.

El pavimento a simple vista tenía buen aspecto, con pendientes longitudinales y transversales adecuadas, bermas de 3,75 m de ancho, imprimadas por lo menos en los 2 m cercanos al concreto asfáltico de base, zona de seguridad empradizada y muy bien conservada. La capa de rodadura tiene 36 m de ancho y la base de concreto asfáltico aproximada-

mente 40 m teniendo así un sobre ancho de 2 m respecto a la rodadura. En los bordes de la zona de seguridad se encuentran dos canales longitudinales para aguas superficiales revestidos de concreto, de profundidad variable entre 25 y 50 cm y sección semicircular.

La capa de rodadura, de concreto asfáltico presentaba una textura bastante porosa y daba la impresión de ser de gradación abierta. Igual cosa podía decirse de la capa de base de concreto asfáltico. Se comprobó la existencia de zonas húmedas con surgencia de agua libre y color blanco en más de 100 sitios de la superficie de la pista y en las bermas entre capas como ya se dijo, con área de 0,25 a 2.0 m<sup>2</sup>. En la mayoría de los sitios de muestreo (2 apiques, 32 núcleos con broca y alrededor de 7 con cincel) se observó acumulación o flujo de agua entre capas asfálticas y especialmente sobre la imprimación de la base granular. Por contraste la base y la subbase granulares aparecían con humedad relativamente baja.

### ENSAYOS DE LABORATORIO

**Muestras tomadas a cincel:** Se trató de bloques de pavimento asfáltico (base y rodadura) los cuales se sometieron a una inspección visual minuciosa encontrándose lo siguiente:

- a) Los bloques pudieron ser disgregados fácilmente, a mano, en terrones más pequeños,

aunque la separación no dejaba superficies con agregados gruesos expuestos, sino que tendía a ocurrir a través del mortero de finos y asfalto. Este fenómeno que implica una deficiente vinculación o entrelazamiento entre porciones de la mezcla, ocurre cuando ésta ha sufrido compactación baja y especialmente cuando la temperatura de compactación ha estado un poco por debajo de la deseable.

- b) Los terrones de mezcla asfáltica se sumergieron en agua durante períodos entre 2 semanas y un mes, observándose que al cabo del 3º y 4º día comenzaba a formarse en la superficie del agua una delgada película de material fino muy liviano. Esto a pesar de que a simple vista los agregados aparecían recubiertos de asfalto. Al recoger cuidadosamente el material fino y depositarlo sobre superficie asfáltica de muestras no sometidas a inmersión, se formaron manchas blancuzcas similares a las observadas en la pista.

**Núcleos de Pavimento:** Los núcleos obtenidos constituyeron el punto central en cuanto a ensayos de laboratorio en este Estudio. Sobre ellos se realizaron las siguientes operaciones:

- a) **Inspección visual y espesores:** Todos los núcleos fueron inspeccionados detenidamente comprobándose que tanto la capa de rodadura como la de base eran porosas, desde luego en menor grado en sitios de apariencia buena del pavimento donde presumiblemente hubo mayor compactación. En algunos núcleos los vacíos de rodadura y base o los de superficie y las paredes estaban intercomunicados, lo cual se comprobó al forzar aire desde diversos puntos y detectar la sonda de salida. La gran mayoría de los núcleos retuvieron la capa de imprimación con partículas gruesas y finas de la base granular adheridas (22 de 32). Este detalle permitió en principio establecer que se hi-

**TABLA N° 11. NUMERO DE ATERRIZAJES EN AEROPUERTO DE PASTO, POR TIPOS DE AERONAVES**

AÑO	B-737-159 B-727-59	Vickers 837	HIBER - DC3 C-47 C-46	HERALD 101	DC-4	+	TOTAL MENSUAL
1971	B-727-24-C						
ABRIL	---	---	1	36	33	5	75
MAYO	---	---	1	31	30	7	69
JUNIO	13	---	3	30	20	2	68
JULIO	13	---	3	31	23	3	73
AGOSTO	17	---	2	39	15	4	77
SEPTIEMBRE	3	---	2	57	25	6	93
OCTUBRE	---	---	1	62	33	25	121
NOVIEMBRE	---	---	---	62	34	38	134
DICIEMBRE	22	26	3	24	16	45	136
1972							
ENERO	28	17	2	12	8	30	97
FEBRERO	23	---	---	28	7	23	81
MARZO	22	30	3	9	9	16	89
ABRIL	23	14	---	17	9	4	67
MAYO	28	---	1	29	1	1	60

+ Aeronaves Livianas - P.B.M.O. inferior a 6.000 kilos  
Aerocomander 500 B - Beechcraft 65B80 - Beechcraft C - 50 - Beechcraft C45H - Cessna 402 A - Cessna TU206D - Fairchild PC6B2 - Islander - Piper 31  
+ EMPRESAS QUE OPERARON: Avianca - La Urraca - Texas - Scexa - Aeropesca - Laos - Aerotaxi - Taeco Tarca - Nariñense de Aviación - Tass - Cessnyca - Jaime H. Caycedo.

E. Neira L.

zo una buena imprimación, con suficiente penetración en la base granular y adherencia satisfactoria al concreto asfáltico de base.

El espesor medido de las 2 capas (base y rodadura) en conjunto, fue en promedio de los 32 núcleos, de 7.06 cm (2.78 plg) con un valor mínimo de 4.73 cm. (1.86 plg.) en el núcleo N° 10 (tomado en zona de buena compactación, 3a. Franja) y un valor máximo de 9.97 cm. (3.92 plg) en el N° 3 (tomado en el Eje de la pista). A continuación se separaron las dos capas de concreto asfáltico, observándose en general buena adherencia entre capas; 22 de los 32 núcleos presentaron agua entre las 2 capas, en la forma de pequeñas gotas en los orificios de salida de algunos vacíos a la superficie de la capa de base. Estudiando su localización se dedujo que no había diferencia en cuanto a presencia de agua, entre zonas buenas y húmedas del pavimento.

b) **Pesos específicos y densidades:** Dada la alta porosidad de los núcleos, hubo necesidad de cubrirlos con parafina para determinar el peso sumergido. Aprovechando la inmersión en agua, previa al ensayo de estabilidad, se determinó el peso sumergido, prácticamente sin parafina, con el fin de hacer una comparación entre los volúmenes hallados. Se pudo apreciar que los de muestras sin parafina eran sistemáticamente menores que los de los núcleos parafinados en valores que fluctuaban entre 1.0 cm<sup>3</sup> y 18.0 cm<sup>3</sup>, o sea un 0.4 a 8.3% de reducción, correspondiente al alto volumen de vacíos en la mezcla. Los pesos específicos eran mayores en los núcleos sin parafina como correspondía a un menor volumen total. Los incrementos coincidían con los porcentajes antes anotados, en los mismos núcleos. De gran interés la comparación de los pesos específicos "bulk" (núcleos parafinados) obtenidos en

el estudio con los de la Interventoría, lo cual permitió observar que había ocurrido una disminución respecto a los valores registrados cuando se hizo la construcción. Este fenómeno se atribuyó a la pérdida de peso experimentada en el transcurso del tiempo.

c) **Estabilidad y Flujo:** Se determinaron los valores de estabilidad y flujo de todos los núcleos, separados en base y rodadura, siguiendo la Norma MOP D-154-64, Método Marshall. La estabilidad promedio de la capa de rodadura fue de 1161 lb con un mínimo de 389 y un máximo de 1964 lb. En la capa de Base, la estabilidad promedio fue de 835.7 lb. con un mínimo de 300 y un máximo de 1.664 lb. Se observó que los valores hallados en la investigación eran en general inferiores a los registrados por la Interventoría cuando la construcción, especialmente en la capa de base. Hubo 21 determinaciones de estabilidad para cada capa de pavimento; de los 21 valores correspondientes a la rodadura, 9 (el 43%) eran inferiores a 1.000 lbs; en los núcleos de base, 14, o sea el 67% eran inferiores a 1.000 lbs. Finalmente, en promedio la base presentaba estabilidades menores en un 28% a las de rodadura.

En cuanto al flujo, se encontró para base un promedio de 12, con un valor mínimo de 8 y un máximo de 17. En la rodadura el promedio era de 11.7 con un mínimo de 9 y un máximo de 15. En promedio los valores de flujo habían disminuido con respecto a los determinados por la Interventoría lo cual se consideró como índice de que la mezcla con el tiempo se había endurecido un poco, al faltarle algo de la matriz de finos y asfalto que imparte la flexibilidad.

d) **Extracción y granulometría de agregados:** Se escogieron al azar varios núcleos de Rodadura y Base y se realizó la determi-

nación del contenido de Asfalto por Extracción en Centrifuga, según la Norma MOP E-52-58, pero usando como solvente el producto 10-20 de la ESSO. Para comprobación se realizaron 4 extracciones en el Laboratorio Central del MOP, a solicitud del L.E.M. Con los valores del porcentaje de asfalto y el peso específico de agregados se efectuó el análisis de vacíos de algunos núcleos.

Los valores promedio del porcentaje de asfalto encontrados fueron para los núcleos de base de 7.55% y para la Rodadura 7.43%. Estos valores fueron superiores a los hallados durante la construcción por la Interventoría, los cuales fueron en promedio 5.3% y 5.2%. La razón para esta aparente ganancia de asfalto era la pérdida de peso de los agregados por el fenómeno de humedad objeto del estudio.

Después de la extracción se determinó la granulometría de agregados mediante lavado sobre el Tamiz 200 y posterior tamizado. Pudo observarse que en líneas generales los agregados cumplían con gran parte de la especificación, pero se destacó el hecho de que el porcentaje que pasa Tamiz 200 presentaba en promedio de las determinaciones hechas, el valor 6.0% mientras que el de los valores hallados durante la construcción del pavimento era de 7.1%. Esto corroboró la pérdida de finos por el proceso de humedad e infiltración que ocurría a través de las capas del pavimento.

e) **Otros ensayos sobre agregados:** Con el propósito de establecer el origen del material blanco de las manchas de humedad, se sometieron a varios ciclos de inmersión en agua, lavado sobre Tamiz N° 200, secado y pesado, los agregados de base granular provenientes de los ensayos de densidad en el terreno, los agregados de los núcleos donde se hizo extracción y una muestra de agregados no usados previamente, de los

conservados en el Aeropuerto para reparaciones, (sobrantes de los empleados en la pavimentación). Los resultados se presentan a continuación:

#### Agregados de Base Granular:

Se tomó una porción de estos materiales, se lavó sobre Tamiz N° 200 y se secó al horno para determinar el peso seco inicial. A continuación se sumergió en agua durante 1 mes, observando que con el paso de los días se iba cubriendo la superficie de los agregados de un polvillo blanco. Al cabo del mes se lavó sobre Tamiz N° 200 y se halló el peso seco, repitiendo luego todo el proceso en los días siguientes. Se comprobó así la pérdida progresiva de material fino desprendido de las partículas de agregados durante la inmersión. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Los suelos que pasaron el Tamiz N° 200 en las determinaciones anteriores se recogieron y se derramaron con el agua de lavado sobre una zona limpia del pavimento de un parqueadero cercano al Laboratorio, donde se formaron manchas blancas al evaporarse el agua.

Los agregados de tamaño superior a aproximadamente 1/2", no tenidos en cuenta en los ensayos de Densidad en el Terreno de la base granular, presentaron el siguiente comportamiento en 2 ciclos de inmersión:

(Ver Tabla 13)

#### Agregados no usados en Mezclas:

Se sometieron al proceso ya descrito, aunque por limitaciones de tiempo para la entrega del informe sólo hubo 1 ciclo de inmersión de 5 días:

(Ver Tabla 14)

#### Agregados de núcleos sometidos a extracción:

Estos materiales se sometieron a ciclos de inmersión; durante la primera semana no se produjo efecto alguno por la influencia de residuos de la película asfáltica y solventes que cubrían las partículas. En la segunda se-

**TABLA 12**

Fecha	Peso Suelo seco, grs.	Pérdida de peso, grs.	% Pasa T N° 200	Incremento de % pasa 200
Julio 9	1.206,2	—	—	—
Ago. 9	1.100,9	105,3	8,73	8,73
" 12	1.073,6	132,6	10,98	2,25

**TABLA 13**

Fecha	Peso Suelo seco, grs.	Pérdida de peso, gr.	% Pasa T N° 200	Incremento de pasa T 200
Agt. 7	488,8	—	0,00	—
" 9	482,3	6,5	1,33	1,33
" 18	480,4	8,4	1,72	0,39

**TABLA 14**

Fecha	Peso Suelo seco, grs.	Pérdida de peso, grs.	% Pasa T-200	Incremento de pasa T-200
Ago. 7	1553,4	—	0,0	—
" 13	1542,6	10,8	0,7	0,7

mana debido al secado al horno después de la primera, desapareció la película mencionada y comenzó a producirse el fenómeno ya descrito de desprendimiento de finos que flotaron en la superficie del agua, los cuales dejaban mancha blancuzca al ser depositados sobre superficie asfáltica y evaporarse el agua que los contenía.

### CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

"El pavimento presenta en sus dos capas de concreto asfáltico alta porosidad y por lo tanto alta permeabilidad, lo cual favorece la infiltración de aguas lluvias. El agua penetra al pavimento y un cierto tiempo después, dependiendo de la intensidad y duración de la precipitación, sale un alto porcentaje por las bermas y por franjas laterales del pavimento, siguiendo la pendiente transversal o bombeo de la pista. La parte de agua que no se elimina en esta forma, se deposita entre las capas de concreto asfáltico y principalmente sobre la imprimación de la base granular; eventualmente parte del agua puede penetrar a esta última capa. La penetración a la base granular puede suceder a través de imperfecciones locales de la imprimación o de intrusiones del concreto

asfáltico de base, o debido al fenómeno de alteración del asfalto que se describe en la sección siguiente."

"El agua que se deposita dentro de las capas del pavimento posteriormente puede salir a la superficie por un fenómeno que obedece a diferenciales de temperatura y presión de vapor dentro de los poros del concreto asfáltico y entre superficies a diferente profundidad. Dependiendo de las condiciones de lluvia, sol y vientos es posible que el agua permanezca saturando los poros formando así columnas continuas entre la imprimación de la base granular y la superficie de rodadura, columnas por las cuales pueden subir las partículas de materiales finos que en presencia del agua se desprenden de los agregados de la base e inclusive de los agregados de mezcla asfáltica". Esas partículas son más livianas que el agua y efectivamente flotan, suben a la superficie, como se mencionó al describir los ensayos de ciclos de inmersión de agregados en el Laboratorio. Al evaporarse posteriormente el agua, las partículas finas quedan adheridas a la superficie del pavimento, formando las manchas blancuzcas tantas veces mencionadas.

El agua que sale por las bermas, entre la capa de Rodadura y la de Base, o entre la Base asfáltica y la

granular, también arrastra partículas finas, en mayor volumen si esa agua en su paso a través del pavimento llega a estar en contacto con materiales de la base granular."

Entre las posibles causas del problema se consideró que el concreto asfáltico de base y rodadura en las zonas donde se presentó el problema de humedad, recibió compactación insuficiente; esto pudo deberse a equipo inadecuado (muy liviano) o a un número insuficiente de pasadas del equipo, o presumiblemente a temperatura de la mezcla un poco más baja de la conveniente. En compactación de capas delgadas de pavimento y dependiendo de las condiciones ambientales, pueden producirse descensos de temperatura de la mezcla que impidan alcanzar la densidad adecuada.

La baja compactación condujo a un alto volumen de vacíos inicial de la mezcla, condición ésta que puede estar asociada con alta permeabilidad. La permeabilidad alta puede a su vez conducir a un endurecimiento prematuro del asfalto, al permitir circulación de aire y agua a través del pavimento. En efecto, el asfalto sufre ciertos cambios por oxidación y polimerización debido a la exposición al agua, aire y luz del sol, causas que son directamente proporcionales al área expuesta de la mezcla; en el caso de un alto volumen de vacíos el área superficial es mayor y esto favorece la alteración del asfalto. Como consecuencia del endurecimiento la película asfáltica se torna quebradiza o presenta pequeñas fisuras que permitirán al agua que se encuentre en los vacíos entrar en contacto con las partículas de agregado. En el caso estudiado, los agregados en presencia del agua sufren cierta desintegración superficial en la forma de un polvillo blanco como se comprobó en el Laboratorio; además, el material que pasa Tamiz N° 200 ya existente pudo flotar o ser arrastrado al cesar la función eficiente de la cobertura asfáltica. Como es obvio, al perderse material fino (llenante de la mezcla) aumentó el volumen de

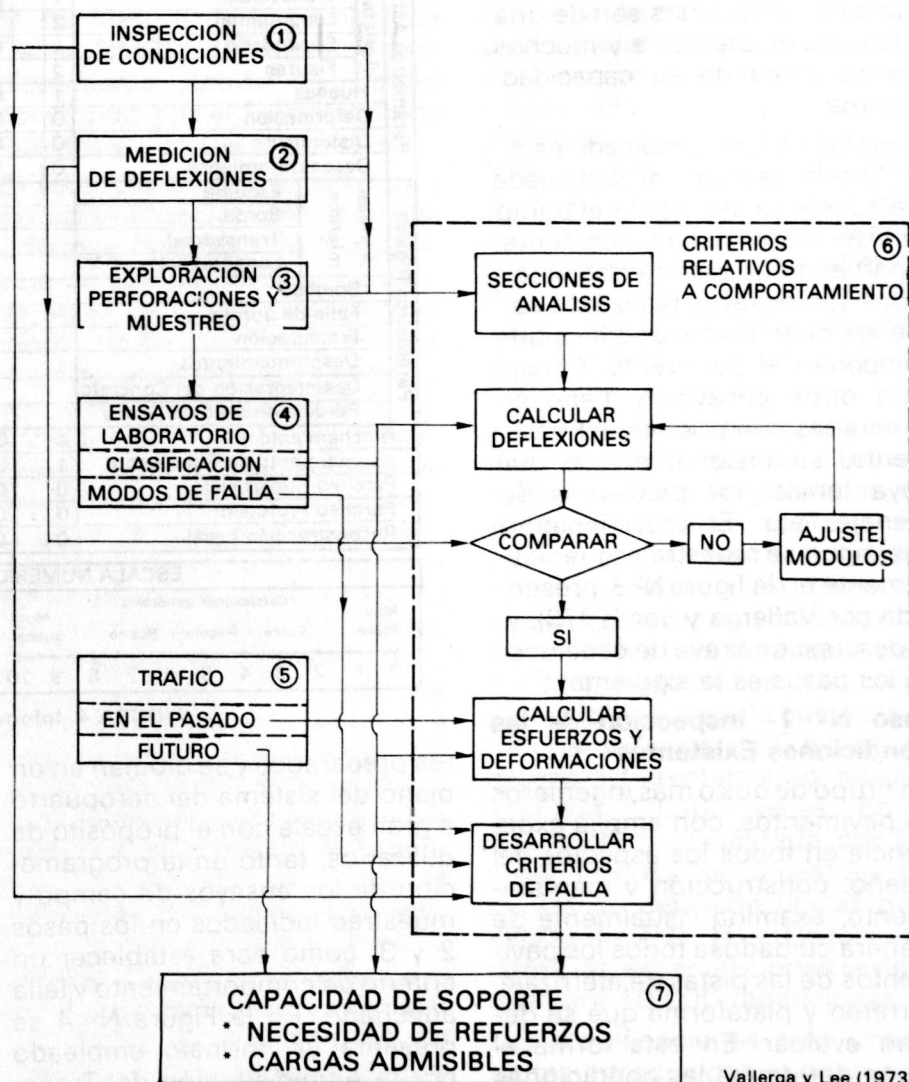
vacíos y por lo tanto contribuyó al proceso descrito arriba, como un círculo vicioso.

El aumento en el porcentaje de asfalto sólo puede explicarse en razón de la pérdida de peso de los agregados; en realidad había permanecido la misma cantidad de asfalto que se adicionó en la construcción, pero la relación de peso de asfalto a peso de los agregados, o a peso total de la mezcla, había aumentado en el transcurso del tiempo. Los agregados usados, debido posiblemente a su origen ígneo (volcánico) contienen materiales que son afectados adversamente por la humedad. Desde luego que en la región no había otras posibilidades en cuanto a tipo o clase de agregados, así sea por simples condiciones económicas. Los efectos de todo el proceso parecen haber sido mayores en la capa de base; esto puede deberse

a que por gravedad el agua fluiría hacia la base, y en dicha capa se depositará más tiempo, detenida por la imprimación y tardará en evaporarse, favoreciendo así el fenómeno estudiado. El hecho de que aún los núcleos tomados en zonas de buena apariencia dieran resultados desfavorables, indujo a pensar que el proceso descrito ocurrió en todo el pavimento, pero con intensidad y magnitud mucho menor en las zonas de mejor compactación; esto último daría una explicación al color gris claro que se observaba en la totalidad de la pista.

## 5- TECNICAS MODERNAS DE EVALUACION DE PAVIMENTOS

Las técnicas utilizadas durante los últimos años en la evaluación de pavimentos tienden a mostrar un notable incremento de la instrumentación electrónica y el em-



Vallerga y Lee (1973)

FIGURA 3. Etapas en el método de evaluación de pavimentos

pleo de ensayos no destructivos, dada la necesidad prioritaria en casi todos los países de mantener permanentemente abiertos los aeropuertos, para atender la demanda creciente del número de usuarios y evitar las apreciables pérdidas que a las compañías aéreas les produce el cierre de un aeropuerto por varios días. Según Weisz (1978), las demoras causadas por la ejecución de ensayos sobre el pavimento de un aeropuerto en Estados Unidos, que obligaron a emplear únicamente dos pistas cuando durante la hora pico se requería un mínimo de tres, significaron en un solo día la suma de US\$ 150.000,00 (aproximadamente \$ 6'000.000.00), sin incluir el costo del exceso de combustible gastado que fue de 1.060 m<sup>3</sup>. En nuestro país estos costos seguramente no serían tan altos puesto que el tráfico es mucho menor, pero sin duda serán apreciables ya que todos nuestros aeropuertos son de una sola pista de aterrizaje y muchos operan cerca de su capacidad máxima.

El método básico empleado es el de "diseño reverso" el cual puede efectuarse ya sea desde el punto de vista matemático únicamente, o partiendo de parámetros obtenidos con ensayos realizados sobre los diferentes materiales que componen el pavimento. Considera otros ensayos y tiene en cuenta las condiciones del pavimento, su historia, el uso que haya tenido, los problemas de drenaje, etc. El procedimiento que sigue se muestra esquemáticamente en la figura N<sup>o</sup> 3, presentada por Vallerga y Lee (1973), y la descripción breve de cada uno de los pasos es la siguiente:

**Paso N<sup>o</sup> 1- Inspección de las Condiciones Existentes**

Un grupo de dos o más ingenieros de pavimentos, con amplia experiencia en todos los aspectos del diseño, construcción y mantenimiento, examina visualmente de manera cuidadosa todos los pavimentos de las pistas de aterrizaje, carreteo y plataforma que se deseen evaluar. En esta forma el grupo determina las condiciones existentes de los pavimentos en

términos de la naturaleza y tamaño de las fallas, el parcheo, la huella de las ruedas, y otras deficiencias estructurales observables. Previamente se debió adelantar la revisión de toda la información disponible relacionada con el diseño, construcción, mantenimiento, condiciones ambientales (precipitación, temperatura), drenaje general y condiciones geotécnicas, con el fin de efectuar una evaluación relativa y subjetiva del pavimento.

Los resultados de la evaluación de campo se registran en forma-

luar visualmente las condiciones estructurales de pavimentos flexibles o rígidos. Hunter et al (1978) señalan que en el Canadá se realiza este tipo de evaluación anualmente en los aeropuertos internacionales y cada 2 años en los nacionales.

**Paso N<sup>o</sup> 2- Medidas de Campo Carga-Deformación**

Esta clase de mediciones ha tenido un notable incremento dado que pertenecen a la categoría de ensayos no destructivos de rápida ejecución, al contrario de los

INFORME DE EVALUACION									
		AREA							
		Pista 14-32	Pista 08-6	Carreteo A	Carreteo B	Plataforma			
AEROPUERTO									
OBSERVADOR									
FECHA									
CONDICION GENERAL		7	6	6	7	7	10		
AÑO DE REHABILITACION		80	90	80	80	80	86		
Parámetros Asfálticos	Malla	0	0	0	0				
	Cuero de caimán	0	0	1	0				
	Mapa	0	0	1	0				
	Transversal	1	0	2	1				
	Longitudinal	2	1	2	2				
	Secundario	1	0	1	1				
	Fisuras	2	1	2	2				
	Huellas	1	0	1	1				
	Deformación	0	0	0	0				
	Distorsión	0	0	1	0				
Descascaramiento	0	0	0	0					
Parámetros Rígidos	Esquina					2	0		
	Borde					0	0		
	Transversal					1	0		
	Longitudinal					1	0		
	Bombeo					0	0		
	Falla de Juntas					1	0		
	Fracturación					0	0		
	Desprendimientos					1	0		
	Desintegración del Concreto					0	0		
	Pérdida de sello de juntas					2	0		
Hinchamiento	1	0	0	0	0	0			
Asentamiento de Subrasante	1	0	1	1	0	0			
Parcheo Superficial	0	0	2	0	0	0			
Parcheo Profundo	0	0	1	0	0	0			
Reconstrucción Local	0	0	0	0	0	0			

ESCALA NUMERICA DE CLASIFICACION										
Condiciones generales					Deterioro global					
Muy Pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy Bueno	0: Ninguno	1: Menor	2: Moderado	3: Mayor	4: Severo	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

FIGURA 4. Informe de Evaluación (Hunter et al, 1978)

tos preparados y se dibujan en un plano del sistema del aeropuerto a gran escala con el propósito de utilizarlos, tanto en la programación de los ensayos de campo y muestreo indicados en los pasos 2 y 3, como para establecer un criterio de comportamiento y falla adecuado. En la Figura N<sup>o</sup> 4 se presenta un formato empleado por la Administración del Transporte Aéreo Canadiense para eva-

ensayos mencionados en el paso N<sup>o</sup> 3, los cuales causan cierres o uso restringido de las pistas de los aeropuertos. Basándonos en las observaciones del paso N<sup>o</sup> 1, se realizan ensayos de carga-deformación sobre todas las áreas del pavimento en un número suficiente para, (a) establecer deflexiones características representativas bajo cargas conocidas, y (b) para diferenciar entre áreas

con deformaciones aceptables y deficientes mediante un tratamiento estadístico. Cualquier equipo disponible que produzca una relación esfuerzo-deformación, ya sea bajo condiciones estáticas o dinámicas, se podrá emplear, siempre y cuando la carga de prueba sea lo suficientemente alta como para producir un valor adecuado de deflexión. Entre los más utilizados figuran la viga Benkelman, el Plato de Carga, el Clasificador de Vías (Road Rater), el Deflectómetro (División de Carreteras de California), el "Dynalect" y el Ensayo No Destructivo de la WES (Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos). La Viga Benkelman es aplicable a pavimentos flexibles y en el caso de evaluación de pistas de aeropuertos se requieren cargas más elevadas que para carreteras. Vallerga y McCullough (1970) utilizaron este equipo en el aeropuerto municipal de la ciudad de Salt Lake aplicando una carga de 9.000 lbs (40.05 KN) sobre dos llantas a intervalos longitudinales de 15 m en la pista de aterrizaje.

El Laboratorio de Puentes y Carreteras de Francia (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) construyó un deflectógrafo (Deflectographe Lacroix) que también se puede emplear en pistas de pavimentos flexibles de aeropuertos para delimitar zonas de comportamiento homogéneo. De acuerdo con Lacroix (1978), con este aparato se pueden obtener deflexiones bajo ambos pares de llantas del eje trasero de un camión cada 3,40 m y con cargas que para las carreteras francesas tienen un límite máximo de 13.000 Kg/eje. El vehículo se moviliza a una velocidad de 1.8 Km por hora de tal forma que es posible evaluar una pista de aterrizaje e menos de 2 hrs. Se pueden tomar secciones longitudinales adicionales en la pista de aterrizaje y Lacroix (1978) recomienda que sean entre cinco y siete, 2 en la pista de carreteo y entre 2 y 5 para la zona de parqueo, dependiendo de sus dimensiones.

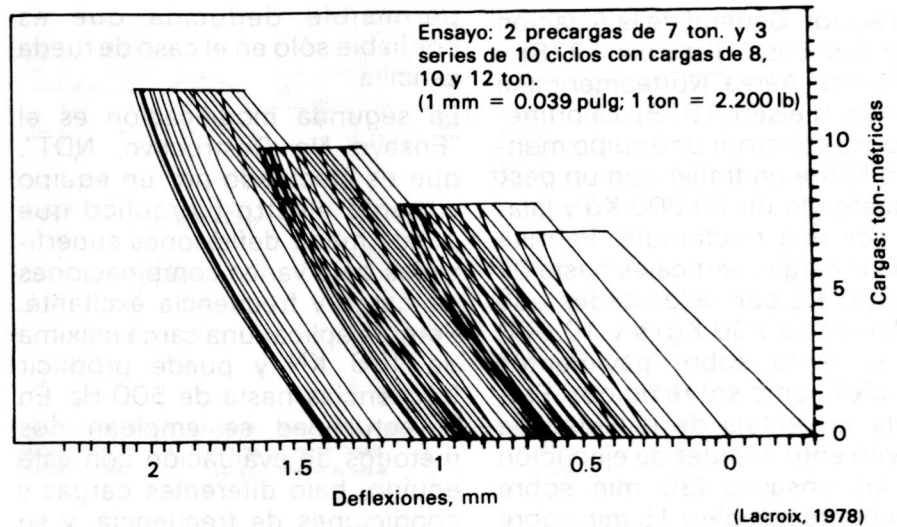


FIGURA 5. Registro típico de ensayo sobre pavimento flexible

En pavimentos rígidos se usa más apropiadamente el "Dynalect", tal como lo emplearon Vallerga y McCullough (1970) en el aeropuerto de la Fuerza Aérea Norteamericana localizado en Palmdale (California del Sur), y el "Dispositif de Mesure de Battement de Dalles, DMBD", (Medidor de desplazamiento vertical de losas) construido por el Laboratorio de Puentes y Carreteras Francés.

Existen, sin embargo, ensayos y equipos utilizables tanto para pavimentos flexibles como rígidos. Uno de los más empleados es el de Plato de Carga que recientemente ha tenido modificaciones importantes tratando de incluir el efecto dinámico de las cargas. El ensayo de Plato de Cargas tradicional presenta variaciones de acuerdo con el tipo de pavimento y según el país o la institución, siendo utilizado principalmente para determinar la capacidad de carga del pavimento. En el caso de los pavimentos rígidos existe la tendencia a ensayar la parte más débil del pavimento, esto es la esquina de la losa en cambio del punto central de ella, y asumir la capacidad de carga como aquella que produce el fisuramiento de la losa dividida por un factor de seguridad de 1.5. Algunos métodos de diseño, como el de la "Portlan Cement Association" y el del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos emplean el módulo de reacción  $k$  de la subbase, el cual se obtiene dividiendo la carga

total (lbs, KN) necesaria para producir el fisuramiento de la losa, por el volumen desplazado (pulg,  $\text{cm}^3$ ), deducido al medir la deflexión producida en diferentes puntos. Para la evaluación de la capacidad de carga de pavimentos flexibles normalmente se emplean platos rígidos de 20.3 y 76.2 cm de diámetro, aplicando cargas repetidas que acumulen la deflexión. El Departamento de Transporte del Canadá (Hunter et al, 1978) define la capacidad portante de la subrasante como la carga que produce una deflexión de 12.5 mm después de 10 repeticiones y cuando se aplica por intermedio de un plato de 76.2 cms. de diámetro.

El Ministerio de la Aviación de la Gran Bretaña (según Brown, 1965) utiliza los resultados de ensayos realizados sobre la superficie del pavimento repitiéndolos cuatro veces para diferentes cargas cada vez mayores y extrapolando los resultados para 10.000 repeticiones. La carga permisible es aquella que ocasiona una deflexión de 0.51 cm en exceso del asentamiento inicial al aplicarla 10.000 veces. En la Figura N° 5 presentada por Lacroix (1978), se muestran las curvas de deflexión típicas para cargas de 7, 8, 10 y 12 tons, así como las extrapolaciones realizadas para 10.000 repeticiones.

Las modificaciones más importantes introducidas al ensayo de Plato de Carga son las de la



“Dirección General de la Aviación Civil Francesa” (Lacroix 1978) y la Fuerza Aérea Norteamericana (Baird y Nielsen, 1978). La primera logró construir un equipo montado sobre un trailer con un peso descargado de 20.000 Kg y jalado por una tractomula. Permite aplicar cargas verticales hasta de 50.000 Kg con velocidades que varían entre 200 Kg/s y 10.000 Kg/s, tanto sobre pavimentos flexibles como sobre rígidos. Presenta la ventaja de facilidad de movimiento, rapidez de ejecución de los ensayos (30 min sobre pavimento flexible y 15 min sobre pavimento rígido) y la aplicación de cargas similares a las reales. Mantiene las desventajas de los ensayos tradicionales como son, la dificultad para interpretar resultados de pavimentos compuestos (pavimentos semi-rígidos) y la limitación de la carga

permisible deducida que es confiable sólo en el caso de rueda sencilla.

La segunda modificación es el “Ensayo No Destructivo, NDT”, que es efectuado por un equipo vibrante electro-hidráulico que puede medir deflexiones superficiales bajo varias combinaciones de carga y frecuencia excitante. Permite aplicar una carga máxima de 138 KN y puede producir frecuencias hasta de 500 Hz. En la actualidad se emplean dos métodos de evaluación con este equipo, bajo diferentes cargas y condiciones de frecuencia, y su aplicación parece promisoria. Un ensayo completo por cualquiera de los dos métodos toma de 2 a 8 min lo cual le da mucha rapidez de ejecución pero tiene inconvenientes importantes como la aplicación puntual de la carga, el peso y volumen apreciables del

equipo y las limitadas comprobación y correlación de los resultados encontrados en el momento.

**Paso Nº 3- Planear y realizar un programa de Exploración y Muestreo**

Con base en los resultados de los pasos anteriores se diseña y se realiza un programa para obtener núcleos del pavimento, muestras de las diferentes capas y muestras inalteradas de la subrasante hasta profundidades adecuadas. Normalmente las perforaciones se efectúan hasta profundidades de 3.0 a 4.5 m pero pueden ser más profundas si se estima que las condiciones encontradas del suelo afectan el comportamiento del pavimento. Se trata de evitar en la actualidad la realización de apiques para la obtención de muestras debido a las demoras y cierres que ocasionan en los aeropuertos. El número y localización de las perforaciones se ajusta de acuerdo con las necesidades de obtención de muestras para ensayos y de una información representativa de las condiciones típicas del pavimento en el sitio.

**Paso Nº 4- Programa y Realización de Ensayos de Laboratorio**

Se deben efectuar básicamente con dos objetivos principales:

- 1- Determinar las propiedades de los materiales dentro de un rango de contenidos de humedad y temperatura, representativo de las variaciones estacionales en el sitio.
- 2- Establecer un criterio de falla de laboratorio.

Con un procedimiento analítico que emplee la teoría elástica, el primer objetivo requiere de ensayos para determinar los parámetros elásticos de cada material como el módulo de resiliencia  $M_r$ , y la relación de Poisson,  $\mu$ , mientras que el segundo requiere el desarrollo de una relación entre una condición conocida de esfuerzo o deformación y una condición de falla, por ejemplo la deformación de tensión en el concreto asfáltico vs el número de aplicaciones

**TABLA Nº 15.- ENSAYO DE MATERIALES DE PAVIMENTOS**

	Cuerpo de Ingenieros U.S. Army	Bureau of Year and Docks U.S.	Agencia Federal de Aviación	LCN Umdo Riens	Depto de Transportes Canadá
Concreto					
Módulo de Elasticidad	--	--			X
Módulo de Rotura	X	X			X <sup>b</sup>
Resistencia a la Compresión	X	--			X
Tensión Indirecta	X <sup>a</sup>	X			--
Espesor	X	X			X <sup>b</sup>
Densidad	--	--			X
Capas Bituminosas					
Espesor	X	X			X
Densidad	X	X			X <sup>c</sup>
Contenido de Asfalto	X	X			X <sup>c</sup>
Gradación de Agregados	X	X			X <sup>c</sup>
Peso Específico de Agregados	--	X			X
Estabilidad y Flujo de corazones	X	--			--
Estabilidad y Flujo de muestras recompactadas	X	X			--
Varios	X	X			X <sup>c</sup>
Propiedades del Asfalto extraído	X	X			X <sup>c</sup>
Base, Subbase y Rodadura					
Espesor	X	X			
Densidad (en sitio)	X	X	X		X
Humedad	X	X	X		X
Gradación	X	X	X		X
Clasificación	X	X	X		X
Peso Específico	X	X	X		X
Compactación de Laboratorio	X	X	--		X
CBR Laboratorio	X	X	--		--
Perfil del Suelo y Nivel	X	X	X		X

a- Requerido cuando no se determina el Módulo de Rotura.

b- Ensayos limitados, si no, emplear valores de diseño.

c- Determinada en casos especiales solamente

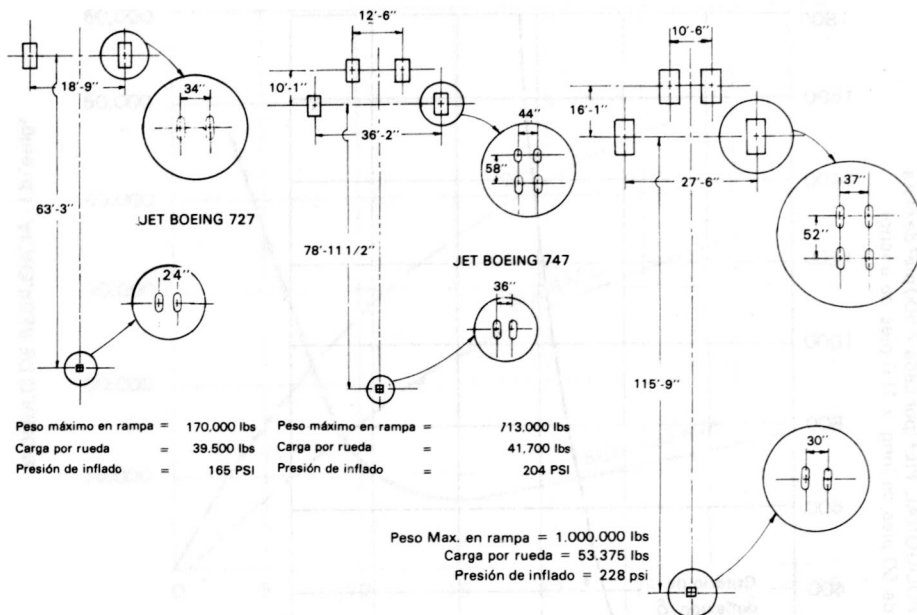
(Brown, 1965)

en la falla por fatiga y el esfuerzo de tensión en el concreto en la falla por flexión.

Se pueden realizar otros ensayos con propósitos de identificación y clasificación como los incluidos en la Tabla N° 15 presentada por Brown (1965), donde también se indican las preferencias de varios métodos en diferentes países e instituciones. Se deben efectuar teniendo en cuenta su utilidad para correlacionar muestras y minimizar el número de ensayos con el fin de emplear al máximo los resultados.

**Paso N° 5- Obtener y analizar la Información de Tráfico**

Se debe conocer el tipo y número de cargas al que ha sido sometido el pavimento, así como las proyecciones del futuro. Esta información debe incluir el peso y tipo de avión, el número de pasadas por determinadas rutas, la presión de inflado de las llantas y la configuración del tren de aterrizaje. En la Tabla N° 16 (Hunter et al, 1978) se presentan



**FIGURA N° 6. Características de los aviones Boeing 727, 747 y 2707**

algunos de los datos necesarios para diferentes aviones comerciales, mientras que en la Figura N° 6 se muestra la disposición del tren de aterrizaje para los aviones Boeing 727, 747 y B-2707. En la Tabla N° 16 es posible apreciar la tendencia general de la aviación

comercial y militar a incrementar los pesos de los aparatos como se mencionó en la Introducción, obligando a la continua evaluación y reforzamiento de los pavimentos de los aeropuertos que utilizan.

Debido a que este paso es relativamente independiente de los anteriores, se desarrolla generalmente desde la iniciación del programa de evaluación ya que puede influir en la planeación de los pasos 3 y 4. Además su información es básica para establecer un criterio de falla sensible a las variaciones en condiciones de carga y para predecir la capacidad de soporte del pavimento.

**Paso N° 6- Desarrollar un criterio de Falla o Comportamiento**

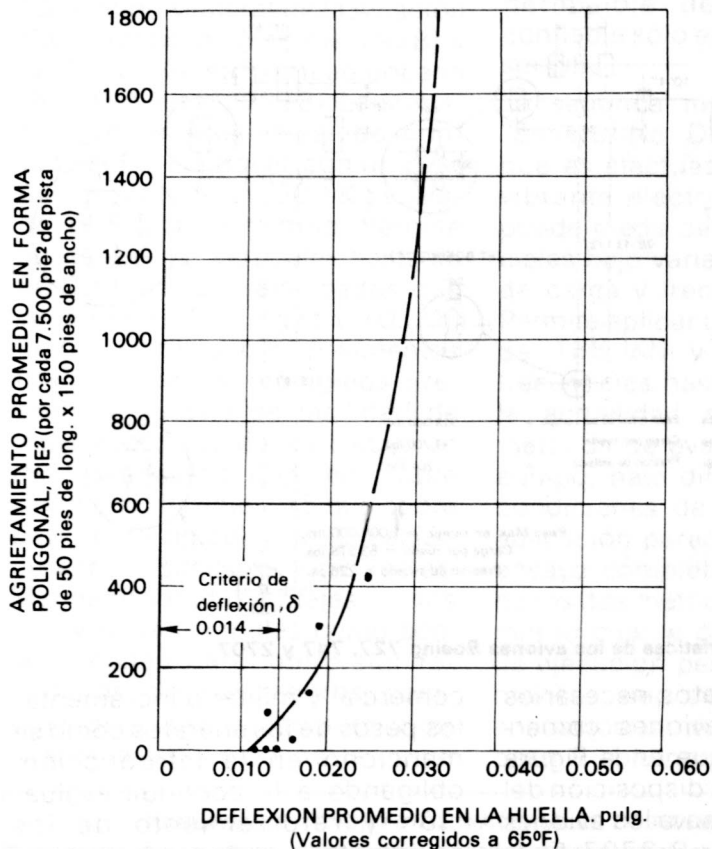
Todos los datos recogidos en los pasos anteriores se utilizan en el análisis estructural del pavimento basado en la teoría elástica para establecer un criterio relacionado con el comportamiento de los diferentes pavimentos bajo las cargas reales aplicadas en un sitio determinado. El criterio debe reflejar únicamente la influencia directa de las condiciones de carga, las propiedades geotécnicas de la subrasante y los parámetros del pavimento y se obtiene a partir de los siguientes análisis:

- 1- Se dividen los pavimentos en secciones con las mismas

TABLA N° 16. CLASIFICACION DE CARGAS DE AVIONES					
Avión (1)	Presión de Inflado lb/pulg <sup>2</sup> (2)	Peso Máximo Miles de lbs (3)	Peso Mínimo Miles de lbs (4)	Intervalo de Peso Miles de lbs (5)	Clasificación (6)
DC-8-63	200	358	158	191-237	9
				237-290	10
				290-350	11
				350-(415)	12
B-747-200	195	823	372	425-538	9
				538-658	10
				658-800	11
				800-	12
L-1011	185	468	240	312-372	10
				372-456	11
				456-(560)	12
B-707 320/420	180	336	135	146-198	8
				198-250	9
				250-302	10
				302-(354)	11
DC-10-20/30	165	558	235	301-378	9
				378-454	10
				454-558	11
				454-558	11
BAC-1-11-550	160	99		76-94	8
				94-(117)	9
B-737	148	111	55	67-86	7
				86-109	8
				109-(140)	9
DC-9-15	127	92	49	62-80	7
				80-(98)	8
F-28-2000	100	65		52-62	6
				62-	7

Nota: 1 lb/pulg<sup>2</sup> = 6,89 KN/m<sup>2</sup>

(Hunter et al, 1978)



**FIGURA 7. Agrietamiento versus Deflexión Corregida bajo carga de 9.000 lb/rueda doble, Pista Instrumentada de Salt Lake City. (Vallerga y McCullough, 1970)**

dimensiones y características, según la información de los pasos 1, 2 y 3.

2- Empleando los parámetros elásticos determinados en el paso 4 y el método de análisis estructural del pavimento basado en la teoría elástica, se calculan las deflexiones totales del pavimento en cada sección con cargas iguales a las empleadas en la medición de deflexiones del

paso 2 y se comparan con las observadas. Las diferencias entre los valores calculados y los medidos deben reflejar la acción combinada de dos efectos: a. Los parámetros elásticos determinados por los materiales y b. El método analítico escogido. Si es necesario se pueden efectuar algunos pequeños ajustes a los parámetros elásticos de los materiales con el fin de

obtener mejor concordancia, dada la relativa dificultad para encontrarlos (\*) (\*\*)

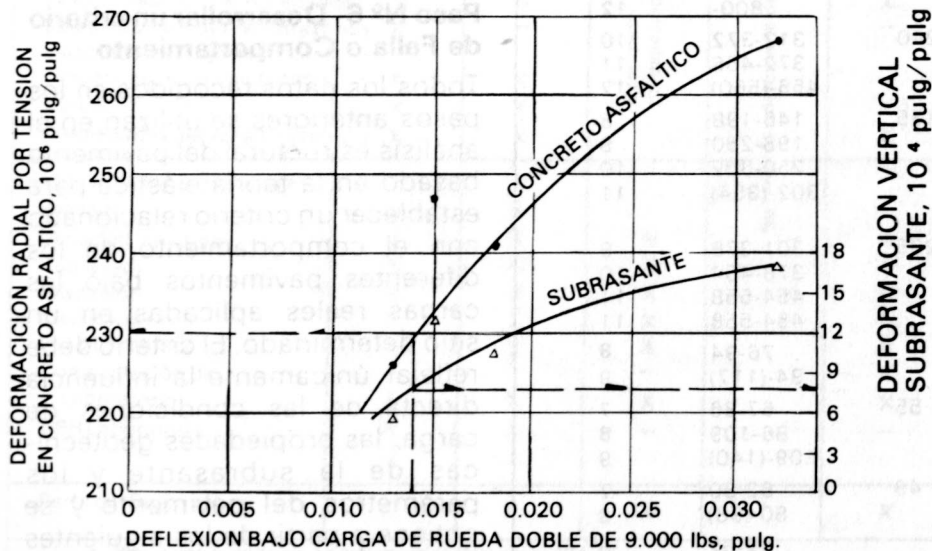
3- Utilizando el método analítico y los parámetros elásticos ya verificados y ajustados se calculan los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en los puntos críticos del pavimento para cada sección y se comparan con:

- a. Comportamiento "aceptable" ó "inaceptable" de las secciones de acuerdo con las observaciones del paso N° 1 y tal como se aprecia en la Figura 7 obtenida en la evaluación de las pistas del aeropuerto de la ciudad de Salt Lake, U.S.A. (Vallerga y McCullough, 1970).
- b. El criterio de falla desarrollado a partir de los ensayos de laboratorio realizados en el paso N° 4. Como ejemplo de este criterio la Figura N° 8 ilustra la correlación entre las deformaciones radiales de tensión calculadas para el concreto asfáltico y la deformación vertical en la subrasante causada por un avión B-727 contra la deflexión bajo un eje cargado con 9.000 lbs.

Con la anterior metodología, se establece un conjunto básico de criterios para los pavimentos del aeropuerto estudiado, en términos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones asociadas con un nivel satisfactorio de comportamiento bajo las cargas del tráfico aplicadas hasta el momento de la evaluación. Estos criterios se pueden programar para que consideren variaciones en las condiciones de carga y el número de aplicaciones si las características del tráfico aumentan en un momento dado.

**Paso N° 7- Determinar las capacidades de Soporte de Carga de los Pavimentos Existentes**

Una vez establecidos los criterios de comportamiento y verificado el método de análisis estructural se evalúan las capacidades de soporte de carga de los pavimentos existentes y se expresan en cualesquiera de las siguientes



**FIGURA 8. Correlación de deformaciones calculadas con deflexiones medidas (Pista SLC)**

Vallerga y McCullough, 1970

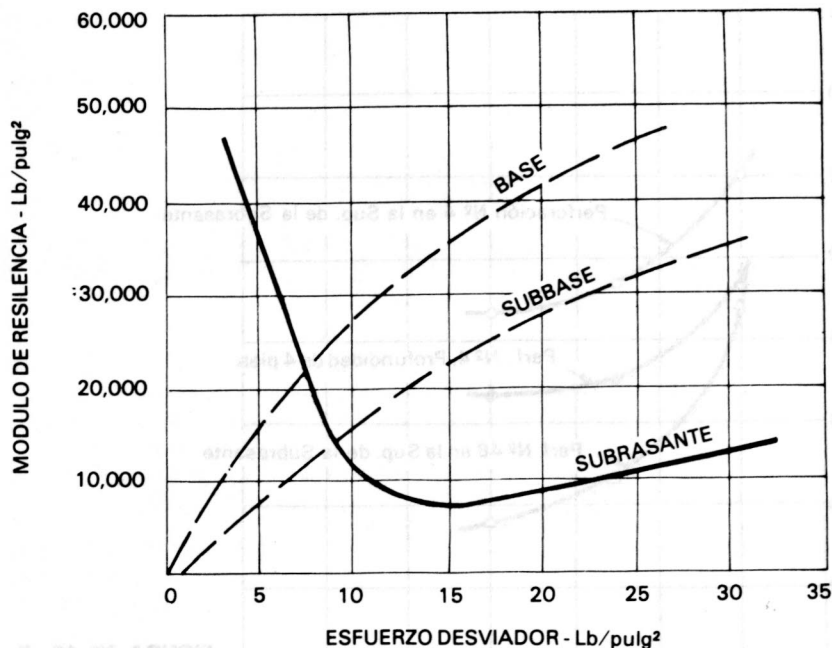
alternativas: 1. Uso ilimitado por determinados tipos de aviones. 2. Uso limitado por ciertos tipos de aviones, esto es, una cantidad máxima de operaciones por tipo de avión. 3. Vida esperada del pavimento para un número de operaciones futuras o un tráfico total proyectado. 4. Requisitos de refuerzo (sobrecapas) para asegurar que el pavimento soporte el tráfico proyectado durante el período de diseño.

En la actualidad, es posible comprobar el comportamiento general de todo el método de evaluación de pavimentos bajo las cargas reales de los aviones. Vallerga y Lee (1973) lograron hacerlo en 1971 en el aeropuerto internacional de San Francisco instalando dos medidores de deflexión con registro electrónico (LVDT) en la pista de aterrizaje y a profundidades de 4.2 m y 10.0 m. Conociendo el peso exacto de 29 aviones y la distancia a la cual pasaron las ruedas respecto de los puntos de localización de los deformímetros en el momento del despegue, calcularon las deflexiones esperadas. La comparación con los valores medidos fue bastante aceptable, especialmente cuando los puntos de aplicación de la carga no estuvieron alejados más de 1.25 m de los sitios donde se midieron las deflexiones.

**APENDICE**

**1. Análisis Estructural del Pavimento**

Se asume que la estructura del



**FIGURA Nº 9. Representación de variación típica del módulo de resiliencia Mr con el nivel del esfuerzo.** (Heukelom y Klomp, 1964)

pavimento, incluyendo la subrasante, se comporta elásticamente bajo las cargas dinámicas de los aviones y que, en consecuencia, en cualquier punto es posible determinar el esfuerzo  $\sigma$  la deformación  $\epsilon$  y la deflexión  $\delta$  por cualquiera de las siguientes dos formas:

- a. Empleando una solución numérica para un sistema de varias capas extendido del método de Burmister (1945) para dos capas. Vallerga y McCullough (1970) indican que existen programas de computador disponibles para soluciones de 5, 15 y n capas (Peutz y Van Kempen, 1968).
- b. Utilizando un método de análisis

basado en elementos finitos para el cual existen programas de computador como el de Duncan et al (1968), Monismith et al (1970) Pichumani (1972) y Pichumani y Crawford (1978).

La última forma tiene la ventaja de que permite variar las propiedades de los materiales lateralmente, así como verticalmente, siendo posible establecer unas condiciones de borde a los lados que representen más exactamente el problema.

**2. Parámetros Elásticos**

Los materiales que componen la estructura del pavimento se pueden caracterizar por la relación de Poisson y uno cualesquiera de los siguientes módulos: 1. Módulo de elasticidad E. 2. Módulo de resiliencia, Mr, dependiendo del nivel de esfuerzos, Mr ( $\sigma$ ). 3. Módulo de rigidez S, dependiendo del tiempo y temperatura, S (t, T).

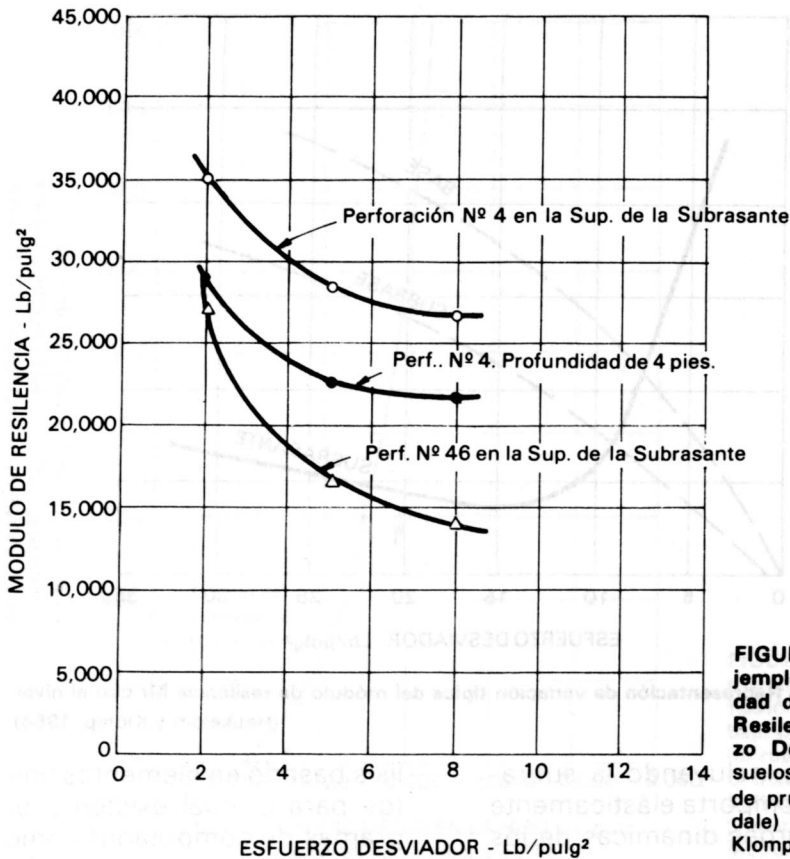
El hormigón de un pavimento rígido se caracteriza por el módulo de elasticidad, E y el concreto asfáltico por el módulo de rigidez, S.

El módulo de resiliencia, Mr, se determina por medio de ensayos triaxiales realizados sobre muestras inalteradas aplicándoles cargas repetidas a diferentes niveles

**Tabla Nº 17. Valores de Módulo de Componentes de las pistas Aeropuerto de Salt Lake City**

Sección de Prueba (1)	Mr del suelo de subrasante (2)	Mr de la sub-lb/pulg <sub>2</sub> (3)	Mr de la base lb/pulg <sub>2</sub> (4)	S Concreto asfáltico lb/pulg <sub>2</sub> (5)
4	2.140	9.900	19.500	1.53 × 10 <sup>5</sup>
5	2.840	9.900	19.500	1.53 × 10 <sup>5</sup>
7	2.130	5.400	5.400	1.53 × 10 <sup>5</sup>
13	4.260	9.900	19.500	1.53 × 10 <sup>5</sup>
9	7.100	9.900	19.500	1.53 × 10 <sup>5</sup>

- a) Estimado de valores CBR por el método de Henkelom y Klomp, y ajustado hasta que las deflexiones calculadas igualan a las medidas bajo carga de 9.000 lbs por rueda doble.
- b) Estimado de datos sobre materiales similares y ajustado para predecir el perfil de deflexión.
- c) Calculado por el método de Vand der Poel de las propiedades reológicas de asfalto recuperado y concentración volumétrica de agregados.



**FIGURA N° 10. Ejemplos de sensibilidad del Módulo de Resiliencia al Esfuerzo Desviador (Para suelos en la Unidad de prueba de Palmdale) (Heukelom y Klomp, 1964).**

de esfuerzos. Se define como el valor del esfuerzo dividido por la deformación recuperable después de la aplicación de la carga un número predeterminado de veces. También se puede obtener

utilizando un método aproximado (Heukelom y Klomp, 1964), partiendo de los valores del CBR determinados sobre muestras remoldeadas, o puede asumirse de valores encontrados en mate-

riales de características similares. Las Figuras 9 y 10 ilustran valores típicos del módulo de resiliencia para una base y subbase granulares y para materiales de subrasante, mientras que la Tabla N° 17 muestra los valores encontrados por diferentes métodos.

El módulo de rigidez,  $S$ , del concreto asfáltico se puede calcular utilizando el método de Van der Poel (Materials Research and Developments, Inc, 1967), a partir de las propiedades reológicas de una muestra de asfalto recuperada empleando el método modificado de Abson (ASTM, 1968) sobre núcleos obtenidos del pavimento.

El módulo de elasticidad,  $E$ , y la relación de Poisson,  $\nu$ , requeridos para el hormigón del pavimento rígido se pueden evaluar aplicando los procedimientos convencionales de la A.S.T.M.

## REFERENCIAS

- ALFORD W. T. "Role of the Airline Pilot in Air Transportation" Airports. Challenges of the Future". Specialty Conference, Air Transport División, ASCE, Arlington Texas, PP. 55-61.
- ASTM (1968). "Standard method of test for recovery of asphalt from solution by Abson method", **Book of standards**, ASTM D 1856, Part II, Philadelphia, p.p. 575-577.
- BAIRD, G.T. y NIELSEN, J.P. (1978) "Proposed load evaluation system for U.S. Air Force", **Transportation Engineering Journal**, ASCE, vol. 104, N° TE5, Proc. Paper 13992, September, p. p. 537-543.
- BROWN, P.P. (1965) "Airfield pavement evaluation procedures", **Aero-Space Transport Division Journal**, ASCE, Vol. 91, N° AT1, Proc. Paper 4299, April, p.p. 15-31.
- BURMISTER, D.M. (1945), "The general theory of stress and displacements of layered systems", **Journal of Applied Physics**, Vol. 16, Nos. 2-3 y 5.
- CALVO CH. (1971), Artículos sobre el aeropuerto de Cartagena, **EL ESPECTADOR**, ediciones del 22 de agosto/70 y 18 de junio/71.
- CHARRY, G. (1977), "Algunas tendencias en el diseño del refuerzo de pavimentos rígidos para Aeropistas", 2º Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, U. del Cauca, Popayán.
- DUNCAN, J.M.; MONISMITH, C.L. and WILSON, E.L. (1968), "Finite element analysis of pavements", **highway Research Record N° 228**, HRB, p.p. 18-33.
- FAA (1963), "Airport Paving", Manual N° AC 150/5320-6A, 9/15/71. Department of Transportation, Washington.
- FAA (1968), "Aircraft Data", Manual N° AC 150/5325-5A, Department of Transportation, Washington D.C.
- GONZALEZ, A.J. y SARRIA, E. (1976), "Terraplenes de gran volumen para el aeropuerto de Bucaramanga", .Primeras Jornadas Geotécnicas, S.C.I., Bogotá.
- HEUKELOM, W. and KLOMP, A.J.G. (1964), "Road design and dynamic loading", **Proceedings**, Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 33, p.p. 92-125.
- HUDSON, W.R. and KENNEDY, T.W. (1973), "Parameters of Rational Airfield Pavement Design System". Transportation Engineering Journal, ASCE, Mayo.
- HUNTER, L.B.R., ARGUE, G.H.L. and GAMBLE, A.C. (1978), "Transport Canada Airfield Pavement load evaluation". **Transportation Engineering Journal**, ASCE, Vol. 104, N° TE5, Proc. Paper 13987, September, p.p. 545-558.
- KEUFEN, W. (1971), "Compactación vibratoria de carpetas gruesas de asfalto", Ingeniería Internacional — Construcción.
- LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES (1971 a), "Posibles Causas de las Fallas de Pavimento Asfáltico, Pista del Aeropuerto de Crespo, Cartagena", Inf. D-070-71, I.E.I., U. Nal., Bogotá, julio.
- L.E.M. (1971 b), "Evaluación del Pavimento Asfáltico - Pista del Aeropuerto EL EDEN, Armenia", Inf. MS4-002-71, I.E.I.,

## Acerca de la Relación Medio Ambiente y Salud de la Comunidad

El presente trabajo fue presentado por el autor al Seminario sobre Política y Salud, organizado por la Oficina de Planeación y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional (1978-1980). En dicho Seminario se tipo el problema de la salud como resultado del grado de desarrollo económico y social de la Comunidad.

JESÚS MARIO ORTIZ ACE

Ing. Civil  
Asociado

- U. Nal., Bogotá, noviembre.
18. L.E.M. (1972), "Evaluación del Pavimento de la Pista del Aeropuerto Antonio Nariño (El Cano), Pasto", Inf. MS4-004-72, I.E.I., U. Nal., Bogotá, agosto.
  19. LACROIX, D. (1978), "French Procedures for Airfield Pavement load evaluation", **Transportation Engineering Journal ASCE**, Vol. 104, N° TE5, Proc. Paper 14011, September, p.p. 559-574.
  20. LEDERMAN, P. y GARCIA, M. (1976), "Evaluación de los métodos empleados por el Ministerio de Obras Públicas para el diseño de pavimentos flexibles", Primer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, S.A.I., Medellín.
  21. MATERIALS RESEARCH AND DEVELOPMENT INC., (1967), "Factors involved in the design of asphaltic surfaces", NCHRP Report N° 39, HRB.
  22. MONISMITH, C.L.; EPPS, J.A.; KASIAN-CHUCK, D.A. and McLEAN, D.B. (1970), "Asphalt mixture behavior in repeated flexure", **Report N° TE 70-5**, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.
  23. MURPHREE, E.L., WOODHEAD, R.W., and WORTMAN, R.H., (1971), "Airfield Pavement Systems", **Transportation Engineering Journal, ASCE**, Agosto.
  24. PEUTZ, M.G.F. and VAN KEMPEN, H.P.M. (1968), "Layered Systems under normal surface loads", **1 Highway Research Record N° 228**, HRB, p.p. 34-45.
  25. PICHUMANI, R. (1972), "Application of Computer codes to the analysis of flexible pavements", **Proceedings**, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, p. p. 506-520.
  26. PICHUMANI, R. and CRAWFORD, J.E. (1974), "Prismatic solid analysis of pavements structures", **Proceedings**, Conference on Analysis and Design in Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 1, p.p. 303-321.
  27. SAA, G. (1976), "Pavimentación de la Pista del Aeropuerto "El Cano" de la ciudad de Pasto - Concreto Asfáltico", Primer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, S.A.I., Medellín.
  28. SANCHEZ, F. (1976), "Primeras experiencias sobre la medida de la resistencia al deslizamiento en los pavimentos de las carreteras nacionales", Primer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, SAI, Medellín.
  29. THE ASPHALT INSTITUTE (1963), "Asphalt Pavements for Airports", Manual Series N° 11 (MS-11).
  30. VALLERGA, B.A. y McCULLOUGH, B.F. (1970), "Pavement evaluation and design for Jumbo Jets", **Geotechnical Bulletin**, oodward — Clyde & Associates, Vol. 4, N° 1, p. p. 2-13.
  31. VALLERGA, B.A. y LEE, R. G. (1973), "Modern Pavement evaluation techniques", **Airports, Challenges of the Future**, Specialty Conference, Air Transport Division, ASCE, Arlington, Texas, p.p. 63-84.
  32. WEISZ, CH.P. (1978), "Airfield pavement evaluation - The airplane view", **Transportation Engineering Journal, ASCE**, Vol. 104, N° TE5, Proc. Papel 13994, September.