

01121
137



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional

NOMBRE: Felipe Zambrano De Lucio

FECHA: 08/SEP/2003

FIRMA: [Firma manuscrita]

T E S I S
PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO

DIRECTOR DE TESIS: ING. FEDERICO DOVALI RAMOS



MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVIACIÓN III
MÉRIDA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/021/03

Señor
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. FEDERICO DOVALI RAMOS, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS"

INTRODUCCIÓN

- I. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL AEROPUERTO
- II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PISTAS, CALLES DE RODAJE Y PLATAFORMAS. INTERRELACIONES ENTRE SUS COMPONENTES Y CON EL ESPACIO AÉREO.
- III. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO Y DESIGNACIÓN DE PISTAS.
- IV. CÁLCULO DE LA LONGITUD
- V. ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS
- VI. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD
- VII. INTEGRACIÓN CON LA RESISTENCIA DEL PAVIMENTO, EL DRENAJE, LAS RADIOAYUDAS Y LAS AYUDAS VISUALES
- VIII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitario a 27 Febrero 2005.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por haberme permitido ser parte de ellas y ser el lugar en donde adquirí todos mis conocimientos.

Al Ingeniero Federico Dovali Ramos, por haberme dirigido y asesorado durante la elaboración de esta tesis, así como en su clase.

Al Dr. Gabriel Echavez Aldape, a la M. I. Martha Suárez López, al Ing. Fernando Favela Lozoya y al Ing. Guillermo Mancilla Guerrero, porque además de ser mis sinodales, fueron algunos de los profesores que me impartieron clases durante la carrera y me proporcionaron sus conocimientos en las áreas correspondientes.

A todos mis demás profesores, por compartir conmigo conocimientos y experiencias para la vida profesional.

A mis padres Leoncio e Irma Velia, que son la raíz de este trabajo, porque ellos siempre me han apoyado y motivado para llegar a la realización de esta tesis y concluir un paso muy importante. Porque me dieron carácter, fuerza, trabajo, sabiduría y sencillez para seguir adelante y poder cumplir todas mis metas, mis sueños y por todos sus consejos llenos de cariño y sinceridad.

A mi hermano Ivan, por hacerme crecer y madurar cuando lo necesito, por sus consejos, por escucharme, por entenderme y por permitirme compartir los mejores momentos de mi vida, así como también por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi hermana Velia, que siempre esta dispuesta a escucharme y querer aprender junto conmigo algo nuevo, por su fortaleza y madurez que siempre esta dispuesta a compartir, por sus sonrisas y sus dulces palabras que me han apoyado todo el tiempo.

A todos mis amigos, que también fueron como mis hermanos durante la carrera, por su amistad sincera, por los trabajos en equipo, las horas de estudio, las horas de discusiones en la realización de tareas, las fiestas, las reuniones, las desveladas y la disposición de escucharme y compartir horas de platica, pero sobre todo por considerarme su amigo.

A las personas que leyeron esta tesis antes de terminarla y me dieron su opinión para que ésta fuera mucho mejor.



Índice	1
Introducción	4
I. Descripción de los Sistemas del Aeropuerto	6
I.1 Espacios aéreos.	6
I.2 Pistas, calles de rodaje y plataformas.	7
I.3 Edificios de pasajeros.	7
I.4 Caminos de acceso.	8
I.5 Almacenamiento de combustible.	8
II. Descripción del Sistema Pistas, Calles de Rodaje y Plataformas. Interrelaciones entre sus componentes y con el espacio aéreo.	9
II.1 Configuraciones de pistas.	10
II.2 Apartaderos de espera.	15
II.3 Apartaderos de estacionamiento.	16
II.4 Anchuras y pendientes.	20
II.5 Distancia visible y perfil longitudinal.	21
II.6 Longitud.	23
II.7 Calles de rodaje.	23
II.8 Márgenes de separación.	27
III. Determinación del número y designación de Pistas.	28
III.1 Capacidad.	28
III.1.1 Factores que afectan la capacidad.	29
III.1.2 Determinación de la capacidad que esta en relación con la demora.	30
III.2 Meteorología.	31
III.2.1 Temperatura ambiente.	31
III.2.2 Elevación sobre el nivel del mar.	31
III.2.3 Pendiente de la pista.	31
III.2.4 Condiciones de la superficie de la pista.	31
III.2.5 Vientos.	32
III.3 Rosa de Vientos cruzados.	33
III.4 Designación de pistas.	35

IV. Cálculo de la Longitud.	36
IV.1 Método de correcciones de longitud de pista por elevación, temperatura y pendiente.	38
IV.2 Método de manuales de vuelo.	41
IV.2.1 Términos operacionales.	41
IV.2.2 Longitud de despegue requerida por los aviones.	41
IV.2.3 Requisitos de distancia para el aterrizaje.	43
V. Especificaciones Geométricas.	56
V.1 Pavimentos.	56
V.2 Márgenes laterales.	59
V.3 Franjas de seguridad.	60
V.4 Áreas de seguridad de extremo de pista.	62
V.5 Zonas libres de obstáculos.	64
V.6 Zonas de parada.	65
VI. Cálculo de la Capacidad.	66
VI.1 Cálculo de la capacidad anual relacionada con la demora, según un método.	66
VI.2 Procedimiento simplificado para el cálculo de la capacidad anual.	67
VI.3 Demora anual.	69
VI.4 Capacidades horaria y anual para diversas configuraciones de pistas.	70
VI.5 Determinación de la capacidad de pista que no está relacionada con la demora.	71
VI.6 Modelos para llegadas solamente.	72
VI.7 Modelos para tiempos de compensación en llegada y con error en el punto de entrada solamente.	73
VI.8 Modelo para operaciones mixtas.	74
VI.9 Volumen anual de operaciones.	76
VII. Integración con la Resistencia del Pavimento, el Drenaje, las Radioayudas y las Ayudas Visuales.	77
VII.1 Resistencia del pavimento.	77
VII.1.1 Pavimentos flexibles.	78
VII.1.2 Pavimentos rígidos.	80
VII.2 Drenaje de aeropuertos.	82
VII.3 Radioayudas.	86
VII.4 Ayudas visuales.	87

VIII. Conclusiones.	97
Bibliografía.	99

INTRODUCCIÓN

Hasta finales de la década de los años 60's la demanda del transporte aéreo era relativamente baja ya que debido a los altos costos que este sistema tenía, permitía su acceso a sólo un porcentaje pequeño de la población con alto nivel económico. En cuanto al transporte de carga, éste prefería utilizar las vías marítimas o terrestres también por el costo que el transporte aéreo implicaba.

En el transcurso de la década de los años 70, las grandes ciudades generaron un movimiento inusitado tanto de pasaje como de carga a través del transporte aéreo causado por el crecimiento de las mismas, el aumento en la demanda y minimización de tiempos de transporte. Las importaciones y las exportaciones se incrementaron de tal forma, que comenzó a darse una interdependencia entre lo comercial y lo turístico, por lo que el transporte aéreo se convirtió en una necesidad primaria para el movimiento de turismo, comercio y carga. Estas razones fundamentales han obligado a los gobiernos de los países a orientar parte de su atención a los aeropuertos, generando una tecnología de punta en la que convergen básicamente: seguridad y funcionalidad, haciendo al transporte aéreo práctico y de fácil acceso para el usuario en todas sus modalidades.

El aeropuerto debe reunir una serie de especificaciones de operación, que afectan tanto a las aeronaves como al personal de apoyo terrestre y a los usuarios.

Los aeropuertos son la conexión, liga o enlace entre dos de los medios de transporte, el aéreo y el terrestre en sus varias modalidades, por lo que en realidad se convierten en una Estación Multimodal de Transporte.

Todo aeropuerto está formado por un conjunto de sistemas, dentro de los cuales se encuentra el Sistema de Pistas, que es en donde se llevan a cabo todas las operaciones de aterrizaje y despegue que permite a las aeronaves realizar con éxito la conexión de transporte. Esta tesis reúne y presenta cuales son las características mínimas que se deben tomar en cuenta para poder desarrollar un proyecto de Pistas desde su etapa de planeación preliminar hasta los momentos en que ya se encuentren operando y proporcionen los servicios adecuados a los usuarios.

Así, a través del desarrollo de la tecnología y de la ingeniería se implementaron normas y regulaciones a nivel internacional en donde se especifica como se deben utilizar todos los factores que afectan los proyectos de pistas, para poder realizarlos con la mejor calidad y seguridad que los usuarios necesitan para que la conexión o enlace que se realiza entre los medios de transporte se lleve a cabo con éxito.

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**

En esta tesis se presentan algunos ejemplos en cuanto al cálculo de la longitud, orientación y designación de pistas, ya que son tres de las características más notables que se deben cuidar en la planificación de pistas por su importancia que tienen respecto a las demás especificaciones que se mencionan en esta tesis, aunque todas éstas deben ser consideradas y calculadas para realizar un proyecto de pistas.

Por ello es que se presentan en los siguientes siete capítulos, cuales son los factores que afectan los sistemas de pistas y la forma de manejarlos, utilizando las regulaciones marcadas por organismos internacionales para el desarrollo de cualquier proyecto.

I. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL AEROPUERTO

Los sistemas de un aeropuerto más importantes son:

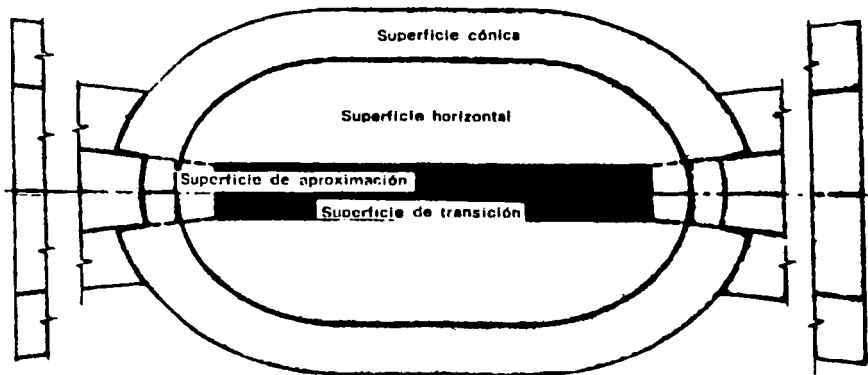
- a. Espacios aéreos.
- b. Pistas, calles de rodaje y plataformas.
- c. Edificio de pasajeros.
- d. Caminos de acceso.
- e. Almacenamiento de combustible.

Estos cinco sistemas son fundamentales para la operación de un aeropuerto, puesto que si uno de éstos falla o se colapsa, el aeropuerto reduce su capacidad o llega a cerrar sus operaciones.

La descripción de los sistemas fundamentales de un aeropuerto es la siguiente:

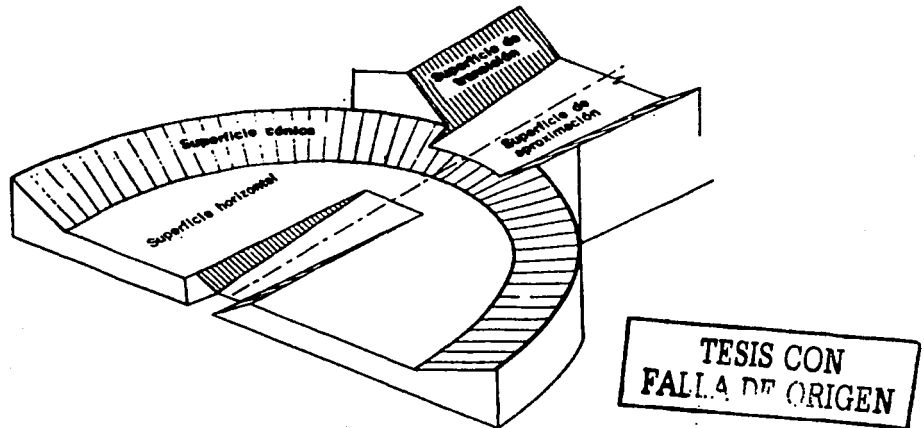
I.1 Espacios aéreos

El espacio aéreo se considera como las inmediaciones del aeropuerto para realizar las maniobras de los aviones, sin obstáculos que restrinjan las operaciones de las aeronaves, como se muestra en las siguientes figuras.



SUPERFICIES IMAGINARIAS DE LOS ESPACIOS AÉREOS.
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



SUPERFICIES IMAGINARIAS DE LOS ESPACIOS AÉREOS.
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

1.2 Pistas, calles de rodaje y plataformas

Las pistas se encargan de proporcionar una adecuada separación en el tránsito aéreo, causando la menor interferencia y demora en los aterrizajes, rodajes y en las operaciones de despegue.

La principal función de las calles de rodaje es la de suministrar acceso entre las pistas hasta las plataformas así como servicio de hangares. Las calles de rodaje deben disponerse de tal manera que el avión que acaba de aterrizar no interfiera con el avión que esta en rodaje o va a despegar.

Las plataformas son áreas pavimentadas donde los aviones se estacionan para cargar combustible, recibir mantenimiento, carga y descarga de pasajeros así como carga en general, estacionamiento de pernocta y operaciones similares que deban desarrollarse.

1.3 Edificio de pasajeros

El edificio de pasajeros es la instalación principal para uso público dentro de un aeropuerto, que incluye el sistema de tratamiento de pasajeros, instalaciones para manejo del equipaje, instalaciones de las compañías aéreas y demás actividades del aeropuerto.

I.4 Caminos de acceso

Los accesos a los aeropuertos no solo son necesarios para los pasajeros de las líneas aéreas, sino que también para otros usuarios tales como empleados, visitantes, transporte de mercancías y autobuses de personas relacionadas con las zonas comerciales del aeropuerto, por esto deben considerarse todos los medios de acceso al aeropuerto, ya sean autopistas, carreteras, calles, etc.

I.5 Almacenamiento de combustible

Los aviones necesitan ser abastecidos en sus respectivas posiciones, por esta razón las plataformas precisan una serie de instalaciones fijas, y en el caso del combustible, los aviones utilizan depósitos de combustible, camiones cisterna o sistemas de hidrantes.

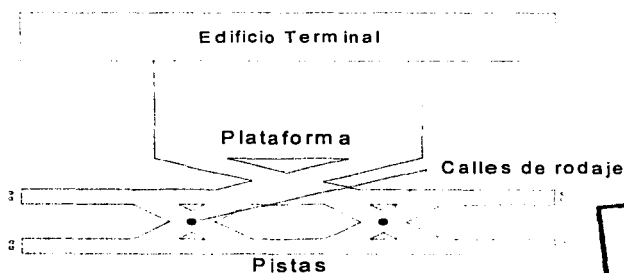
II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PISTAS, CALLES DE RODAJE Y PLATAFORMAS. INTERRELACIONES ENTRE SUS COMPONENTES Y CON EL ESPACIO AÉREO.

Como se mencionó anteriormente las pistas, sirven primordialmente para proporcionar una adecuada separación en el tránsito aéreo que causen la menor interferencia y demora en el aterrizaje, así como en las operaciones de despegue.

Deben proporcionar el menor recorrido posible desde las plataformas hasta las cabeceras de pista y deben estar provistas de las calles de rodaje adecuadas, de tal manera que el avión que aterriza pueda abandonar las pistas tan rápido como sea posible y pueda recorrer el espacio hasta llegar al área terminal o plataformas en el menor tiempo posible.

En los aeropuertos de gran tamaño, las calles de rodaje de salida deben situarse en diferentes puntos a lo largo de las pistas, de tal manera que los aviones que aterrizan puedan abandonarlas tan rápidamente como sea posible para dejarlas libres al resto de los aviones que están por utilizarlas, dichas calles se conocen comúnmente como "*calle de salida de pista*". Siempre que sea posible, las calles de rodaje deberán estar proyectadas de tal manera que no se crucen con pistas abiertas al tránsito.

Anteriormente se mencionó que las plataformas son el área de enlace con el edificio de pasajeros, y donde el avión se estaciona, para que se lleven a cabo las diferentes maniobras y servicios, dentro y fuera del aeronave, como son la descarga de equipaje u otros, reabastecimiento de combustible, preparación para otra operación de despegue, reparación y mantenimiento en hangares o para que el aeronave pernocte en el aeropuerto si es el caso, etc. Existen cinco tipos de plataformas que se pueden presentar en un aeropuerto, según el uso: Comercial, Pernocta, Aviación general, Mantenimiento y Militar.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESQUEMA DE SISTEMAS QUE CONFORMAN UN AEROPUERTO.

Fuente. Ing. Federico Dovali Ramos. Apuntes de Aeropuertos.

Ubicando las pistas, calles de rodaje y plataformas en un aeropuerto, los espacios aéreos quedarían definidos como se indicó anteriormente, según la definición de espacios aéreos, éstos deberán estar determinados por aquellos espacios en donde las aeronaves puedan efectuar maniobras antes de iniciar cualquier operación de despegue o de aterrizaje.

II.1 Configuraciones de pistas

Debido a que existen diferentes configuraciones de pistas, es posible dividir las en cuatro básicas, las cuales al combinarse presentan la mayoría de las existentes. Las configuraciones básicas de pistas son las siguientes:

- a. Pista única. Esta es la más simple de las configuraciones, se ha estimado que su capacidad horaria, en condiciones VFR¹, se encuentra entre las 45 y 100 operaciones por hora, mientras que en condiciones IFR² la capacidad se reduce de 30 a 50 operaciones, dependiendo de las distintas combinaciones de demanda y de las ayudas a la navegación disponibles.



PISTA ÚNICA.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- b. Pistas paralelas. Las capacidades de los sistemas de pistas paralelas dependen en gran parte del número de ellas y de la separación entre las mismas. Son muy comunes las configuraciones en conjunto de dos o cuatro pistas paralelas, pero es muy raro encontrar aeropuertos que tengan más de cuatro pistas paralelas, debido a que pocos lugares pueden generar una demanda tal, que se pueda atender la capacidad que proporcionan cinco o más pistas paralelas, además de que la capacidad del sistema de control de tránsito aéreo para suministrar asistencia a cinco o más pistas al mismo tiempo, se hace progresivamente más complicado y las necesidades de espacio aéreo aumentan enormemente.

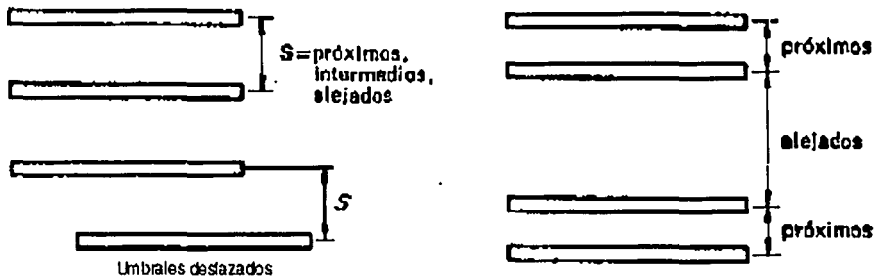
La distancia entre pistas paralelas varía ampliamente, por efectos de capacidad por lo que la separación entre pistas se clasifica en: próximas, intermedias y alejadas; dependiendo del grado de independencia de las pistas en condiciones IFR. Las pistas paralelas próximas deben tener una separación desde un mínimo de 210 m (para aeropuertos dedicados a la

¹ VFR. Visual Flight Rules. (Reglas de Vuelo Visuales)

² IFR. Instrumental Flight Rules. (Reglas de Vuelo por Instrumentos)

aviación comercial) hasta los 760 m como máximo. Bajo condiciones IFR, una operación en una pista depende de la que se esté realizando en la otra, las pistas paralelas con separación intermedia van desde 760 m hasta un máximo de 1,300 m, por lo que una llegada en una pista es dentro de ciertos límites, independiente de una salida en la otra. Alejadas 1,300 m o más, bajo éstas condiciones, ambas pistas pueden operar independientemente para llegadas como para salidas.

Si se considera que los edificios de pasajeros están situados entre dos pistas paralelas, éstas deben estar bastante separadas con el objeto de dejar espacio para los edificios, zona de estacionamiento adyacente y las calles de rodaje necesarias. Cuando existen cuatro pistas paralelas, la distancia entre cada par es relativamente pequeña pero entre pares, será lo bastante grande para dejar espacio suficiente a la zona terrestre, tal y como se muestra en la figura.



PISTAS PARALELAS.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Las capacidades horarias de las pistas paralelas con separaciones próximas, intermedias o alejadas pueden variar aproximadamente desde 100 a 200 operaciones, en condiciones VFR, dependiendo de la composición de los flujos y tipos de aeronaves. La mayor capacidad está asociada a las pequeñas aeronaves de aviación general. La separación no afecta la capacidad en condiciones VFR, a menos que estén operando grandes aeronaves. Bajo condiciones IFR, la capacidad horaria para pistas paralelas con pequeña separación puede variar desde 50 o hasta más de 60 operaciones de aeronaves que no tienen turbinas, dependiendo de la composición de la flota, para pistas con separaciones intermedias la variación va de 70 a 80 operaciones por hora y para pistas alejadas la oscilación es de 85 a cerca de 105 operaciones por hora.

Existen casos en los que es conveniente escalonar las cabeceras de las pistas paralelas, lo que puede ser necesario debido a la configuración del terreno disponible para la construcción de las pistas o para reducir la longitud de rodaje de la aeronave que despegue o aterrice. Sin embargo, la reducción en la longitud de rodaje, se basa en la hipótesis de que una pista se va a utilizar exclusivamente para despegues y la otra para aterrizajes. En este caso, los edificios se sitúan entre las pistas de tal manera que la distancia de rodaje de los aviones para cada tipo de operación sea mínima.

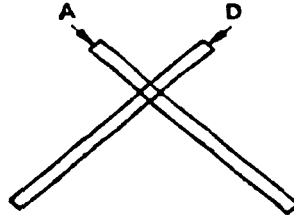
Las pistas de doble calzada (Dual-Lane), constan de dos pistas paralelas próximas con las apropiadas calles de salida y de entrada. Aunque ambas pueden utilizarse para operaciones mixtas, lo ideal es dedicar la pista más alejada del edificio (pista exterior), para llegadas (aterrizajes) y la más cercana para salidas (despegue). Se estima que una configuración de este tipo puede admitir por lo menos un 70% más de tránsito que una pista única, en condiciones VFR y cerca del 60% más en su análogo bajo condiciones IFR. Se ha comprobado que la capacidad no queda afectada por las separaciones entre ejes de pistas comprendidas entre los 300 y 1,049 m, sin embargo, ésta se incrementa un poco a partir de los 700 m. Se recomienda, por tanto, que las dos pistas no estén separadas menos de 300 m cuando operan las líneas aéreas y principalmente cuando involucren aviones de gran tamaño. Con esta separación también se dispone de la distancia suficiente de recorrido para que una aeronave que aterrice pueda detenerse entre las dos pistas. Puede disponerse también de una calle de rodaje paralela entre las pistas para lograr un pequeño incremento de capacidad, pero esto no es esencial. La mayor ventaja que ofrece esta configuración es incrementar la capacidad en condiciones IFR con la mínima adquisición de terreno.

- c. Pistas que se cortan. Este tipo de pistas son necesarias cuando se presentan vientos relativamente fuertes desde más de una dirección, ya que se producen excesivos vientos cruzados en el caso de existir una sola pista. Cuando los vientos son fuertes puede utilizarse solamente una pista, reduciéndose substancialmente la capacidad del aeropuerto. Si los vientos son ligeros, pueden utilizarse consecutivamente ambas pistas, aunque por el efecto del cruce de pistas no es posible utilizarlas simultáneamente. La capacidad de este tipo de pistas, depende en gran medida de la situación del punto de intersección (ya sea en el centro o en los extremos) y de la forma en que las pistas son utilizadas, lo que se conoce como estrategia. (despegue o aterrizaje)

Cuanto más lejos esté situada la intersección de la cabecera de despegue y del umbral, la capacidad es menor. La mayor capacidad se consigue cuando la intersección está cerca de la cabecera de pista para el despegue y del umbral para el aterrizaje.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

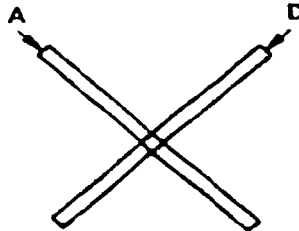
En la estrategia que se muestra en la figura, la capacidad horaria es de 60 a 70 operaciones bajo condiciones IFR y de 70 a 175 VFR, dependiendo de la combinación de los aviones.



A aterrizaje
D despegue

PISTAS QUE SE CORTAN CERCA DEL UMBRAL.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

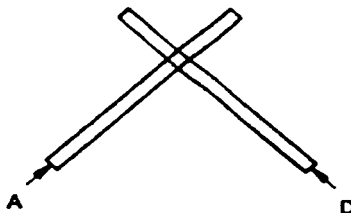
En la estrategia de la siguiente figura la capacidad horaria IFR es de 45 a 60 operaciones y de 50 a 100 operaciones VFR.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

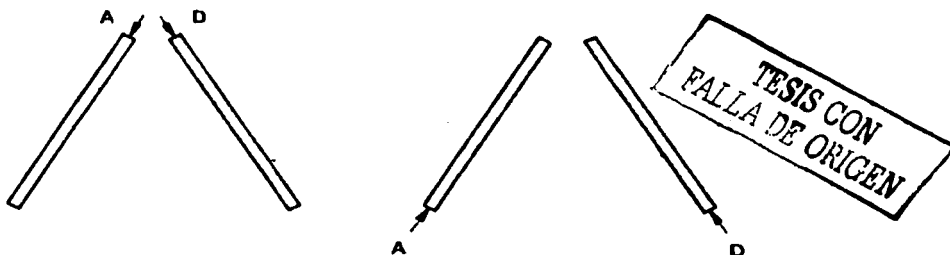
PISTAS QUE SE CORTAN EN EL CENTRO.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

En la disposición de la figura siguiente, la capacidad horaria en IFR es de 40 a 55 y la capacidad en VFR es de 60 a 100 operaciones. Cabe hacer hincapié en que siempre que sea posible, se deben evitar las pistas que se cortan.



PISTAS QUE SE CORTAN LEJOS DEL UMBRAL.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

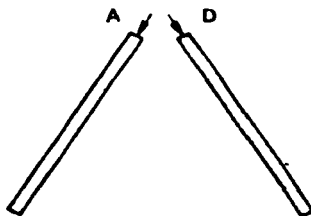
- d. Pistas en V abierta. son las pistas en direcciones divergentes y que no se cruzan, dicha configuración es la que se muestra en la figura.



PISTAS EN V ABIERTA.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

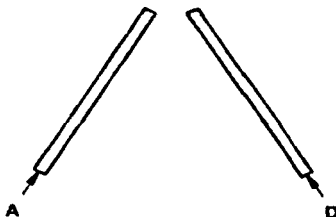
Al igual que las pistas que se cortan, las pistas en V abierta, se reducen a una pista única, cuando los vientos en una dirección son fuertes; si los vientos son ligeros, pueden utilizarse consecutivamente ambas pistas, aunque por el efecto del cruce de pistas, no es posible utilizarlas simultáneamente. La estrategia que ofrece la mayor capacidad es aquella en la que las operaciones se efectúan saliendo del vértice de la V. En

condiciones IFR, la capacidad horaria para esta estrategia varía de 60 a 70 operaciones dependiendo de la combinación de aviones y en condiciones VFR las cifras correspondientes son de 80 a 200, como se observa en la figura.



PISTAS EN V ABIERTA SALIENDO DEL VÉRTICE.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Cuando las operaciones se realizan hacia el vértice de la V, la capacidad horaria se reduce de 50 a 60 operaciones en IFR y de 50 a 100 en VFR.



PISTAS EN V ABIERTA ENTRANDO AL VÉRTICE.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

II.2 Apartaderos de espera

Conocidas anteriormente como "zonas de comprobación" o "calentamiento de motores" (debido a los motores de pistón que se utilizaban con anterioridad), es conveniente que se sitúen en las proximidades de los finales de pistas. Estas zonas son lo suficientemente amplias por si un avión no puede despegar, debido a algún fallo, otro avión que esté preparado para despegar pueda pasar a la pista.

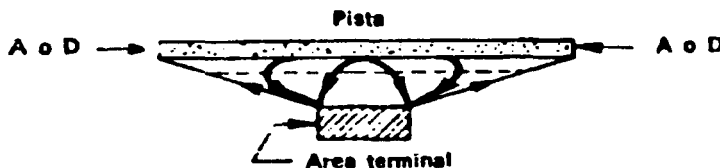
Estas zonas de espera deben proyectarse de tal manera que puedan albergar de dos a cuatro aeronaves permitiendo espacio suficiente para que un avión pueda pasar a otro. El área asignada para la espera del avión dependerá de las dimensiones de éste y de su maniobrabilidad. Siempre que sea posible, los apartaderos de espera deben localizarse de tal manera que permitan que los aviones que salen de ellos para entrar en pista, lo hagan en un ángulo de 90° y deberán construirse de tal forma que los aviones puedan tener acceso a la pista lo más cerca posible del final de ella. La espera de los aviones debe situarse fuera del camino de rodaje para que el chorro del avión que espera no se dirija hacia las aeronaves que pasan.

II.3 Apartaderos de estacionamiento

Estas zonas son áreas relativamente pequeñas situadas convenientemente en el aeropuerto para estacionamiento temporal de las aeronaves. Esto es debido a que en algunos aeropuertos, el número de posiciones de estacionamiento puede ser insuficiente para manejar la demanda durante un período punta del día. En este caso, los aviones se dirigen hacia un apartadero de estacionamiento y quedan allí hasta que queda una posición disponible. (estos estacionamientos no son necesarios si la capacidad de la plataforma es igual o menor a la demanda)

Un punto clave para llegar a obtener una buena configuración en un aeropuerto, es conseguir que las distancias que el avión tiene que recorrer por las calles de rodaje desde las plataformas hasta las cabeceras de pista para el despegue, sean lo más cortas posible, al igual que las distancias que debe recorrer después del aterrizaje.

La siguiente figura muestra un aeropuerto con una pista única, ya que se ha supuesto que el número de despegues y aterrizajes sería el mismo en cada dirección.

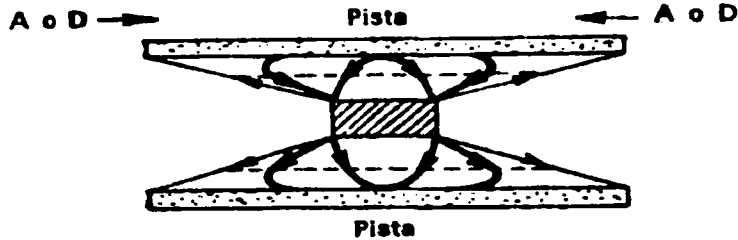


PISTA ÚNICA CON ÁREA TERRESTRE.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**

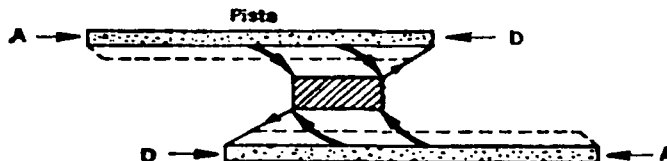
Si el volumen de tránsito justifica una segunda pista paralela, la ubicación del área terrestre, con respecto a las pistas, sería como la que muestra la siguiente figura.



PISTAS PARALELAS CON ZONA TERRESTRE ENTRE ELLAS.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

En la figura se presupone que las condiciones del viento son tales que los aterrizajes y despegues pueden hacerse en cualquier dirección. En los aeropuertos con un alto volumen de tránsito resulta conveniente tener siempre una pista disponible para aterrizajes, ya que alguna pudiera estar fuera de servicio para mantenimiento u otros fines.

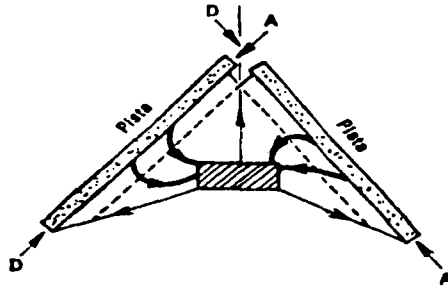
Si se desea tener una pista dedicada exclusivamente a aterrizajes y otra para despegues, puede considerarse la siguiente figura, cuya principal ventaja en comparación con la figura anterior es que las distancias de rodaje tanto para los despegues como para los aterrizajes es más reducida. La desventaja es que la estrategia está basada en el uso exclusivo de una pista para una función específica ya sea aterrizaje o despegue y se requieren mayores superficies de terreno.



PISTAS PARALELAS CON UMBRALES DESFAZADOS.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Si comparamos las dos configuraciones anteriores, se puede concluir que no es aconsejable situar el área terrestre a uno de los lados de las pistas paralelas, puesto que las distancias de rodaje son muy largas y el tránsito por tierra de los aviones requiere cruzar la pista en servicio, reduciendo la capacidad.

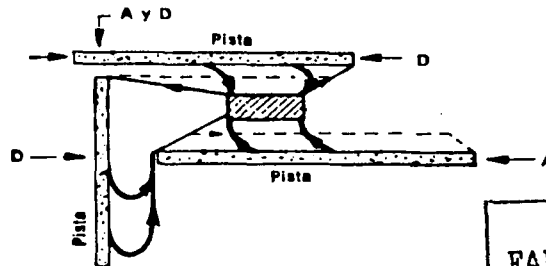
En cambio si a causa de los vientos se hace necesario disponer de pistas en más de una dirección, resulta aconsejable localizar el área en el centro, tal como se puede observar en la siguiente figura. En el caso de esta disposición se supone que, cuando los vientos son ligeros, el controlador es capaz de utilizar ambas pistas tanto para aterrizaje como para despegue.



PISTA EN V.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

En algunos aeropuertos, los vientos soplan regularmente en la misma dirección durante casi todo el año, excepto en cortos periodos de tiempo. Si se esperan grandes volúmenes de tránsito, se necesitarán tres pistas con dos orientaciones y el área terrestre queda situada como se muestra en la figura a continuación.

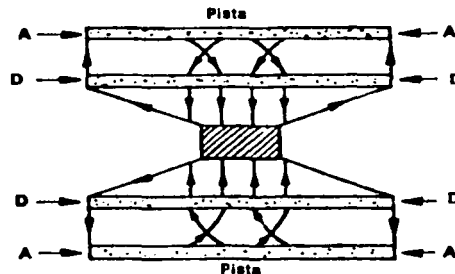


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TRES PISTAS, DOS ORIENTACIONES.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

En los aeropuertos con una densidad de tránsito muy alta y que se dedican a los aviones de transporte, es posible disponer de cuatro pistas paralelas tal y como se indica en la siguiente figura.



CUATRO PISTAS EN PARALELO.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Nota: Cabe señalar que las distancias a recorrer en las calles de rodaje son iguales, sin tener en cuenta cuál de las cabeceras de pista es la que se utiliza para el despegue y que la zona terrestre se ha situado convenientemente para el aterrizaje desde cualquiera de las direcciones. (La simbología de las figuras anteriores se muestra a continuación)

SIMBOLOGÍA DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE PISTAS.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Calles de rodaje para salida de aeronaves

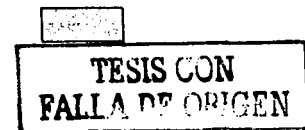
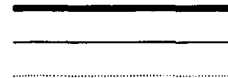
Calles de rodaje para llegada de aeronaves

Unión entre calles de rodaje paralelas

Área terrestre

D - Despegue

A - Aterrizaje



Para este tipo de configuración resulta aconsejable reservar dos pistas exclusivamente para aterrizaje y otras dos para despegue, con objeto de evitar interferencias de tránsito de los aviones en tierra. Obsérvese que las pistas adyacentes al área terrestre y no las pistas exteriores son las que se han elegido para el despegue ya que se debe evitar que el avión que despegue cruce las pistas

de aterrizaje, aunque el avión que aterriza debe cruzar por tierra las pistas de despegue en servicio. El control de tránsito prefiere este tipo de cruce, ya que además se reduce el consumo de combustible.

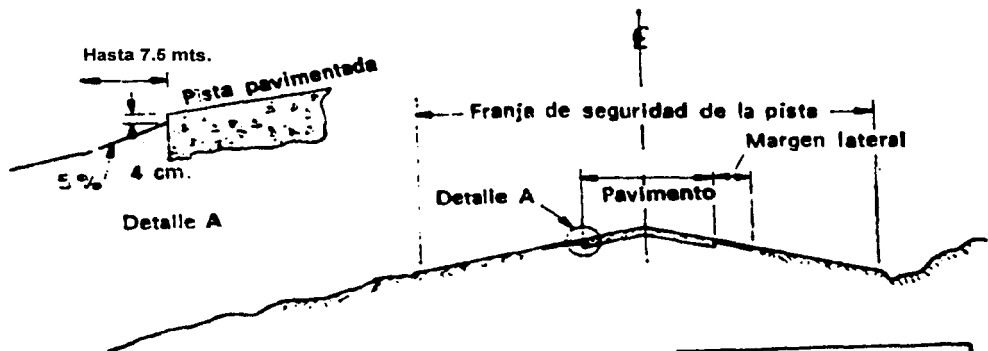
Siempre que sea posible, el área terrestre debe localizarse de tal manera que el avión que despegue o aterriza no pase directamente por encima de la misma a muy baja altura ya que representa un peligro y las correspondientes molestias.

II.4 Anchuras y pendientes

Con objeto de comprender los términos utilizados para definir los diferentes componentes de una pista, a continuación se mencionan sus principales elementos:

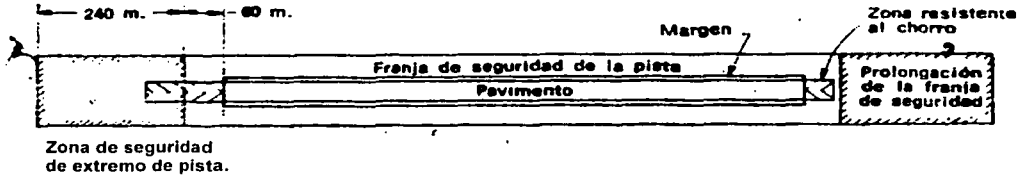
- Pavimento*: soporta la carga del avión, transmitiéndola al terreno natural.
- Márgenes laterales*: áreas laterales adyacentes al pavimento, proyectadas para resistir la erosión del chorro de los motores y permitir el paso de los equipos de mantenimiento y vigilancia.
- Franja de seguridad*, que incluye el pavimento, las márgenes laterales y un área despejada, drenada y nivelada.

Las siguientes figuras ilustran dicha franja.



SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA PISTA.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN



ELEMENTOS DE UNA PISTA VISTA EN PLANTA.
 Fuente: Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

- d. *Zona resistente al chorro*: área diseñada para prevenir la erosión de las superficies adyacentes a los finales de pista, que están expuestas a sufrir los repetidos chorros de los reactores en los despegues.
- e. *Área complementaria de seguridad*: es una prolongación de seguridad, la cual se dispone siempre que sea posible para reducir los accidentes de los aterrizajes cortos o de rebases de pistas. (Zona de seguridad de extremo de pista)

II.5 Distancia visible y perfil longitudinal

Los factores que se deben tomar en cuenta para calcular un perfil longitudinal son, el radio de curvatura, la distancia visible, la distancia mínima permisible entre los puntos de intersección de las curvas verticales y la relación entre los cambios de pendiente.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de aeropuertos, según la longitud de campo de referencia del avión, envergadura y ancho exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal.

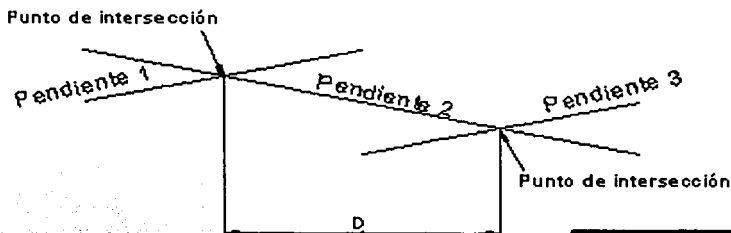
Elemento 1 de clave		Elemento 2 de clave		
No. clave	Longitud de campo de referencia del avión	Letra clave	Envergadura	Ancho exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal ^a
1	Menos de 800 m	A	Hasta 15 m ^b	Hasta 4.5 m ^b
2	800 – 1200 m ^b	B	15 – 24 m ^b	4.5 – 6 m ^b
3	1200 – 1800 m ^b	C	24 – 36 m ^b	6 – 9 m ^b
4	Desde 1800 m en adelante	D	36 – 52 m ^b	9 – 14 m ^b
		E	52 – 65 m ^b	9 – 14 m ^b
		F	65 – 80 m ^b	14 – 16 m ^b

^a Distancia entre los bordes exteriores de las ruedas del tren de aterrizaje principal.
^b Exclusive.

Fuente: Anexo 14 y Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Con respecto a la distancia visible, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI)³ exige la existencia de una línea de visión sin obstrucciones desde cualquier punto a 3 m por encima de la pista y dirigida al resto de los puntos situados a 3 m por encima de la misma, dentro de una distancia de por lo menos la mitad de la longitud de la pista, cuando ésta pertenece a la categoría A, B o C y 2 m por encima de ella, cuando ésta pertenece a la categoría D o E. Por su parte la FAA⁴ no impone condiciones para la distancia visible en los aeropuertos que disponen de torres de control, aunque las normas para las pendientes longitudinales en estos aeropuertos prevén una línea de visión adecuada, mientras que en otros aeropuertos, la FAA exige la existencia de una línea de visión sin obstrucción desde cualquier punto a 1.5 m por encima de la pista y dirigida a todo el resto de puntos situados a 1.5 m por encima de la misma, a lo largo de su longitud total.

Con respecto al perfil longitudinal, es conveniente minimizar los cambios de pendiente lo más posible, sin embargo, esto puede no ser posible por razones económicas, es por esto que la OACI y la FAA permiten los cambios de pendiente pero limitan su número y dimensiones. Estos cambios se llevan a cabo por medio de curvas verticales, cuya longitud se determina por la magnitud del cambio de pendiente y el máximo cambio de pendiente permisible por cada 30 m de pista. El número de cambios de pendiente está limitado por las reglas referidas en la figura que se muestra a continuación. La OACI exige que la distancia entre los puntos de intersección de dos curvas sucesivas no deberá ser menor, que la de los valores numéricos absolutos de los cambios de pendiente, multiplicado por el número apropiado que es de 30,000 m para las pistas de categoría A y B, 15,000 m para las pistas de categoría C y 4,950 m para las pistas de categoría D y E. La FAA exige 30,000 m para los aeropuertos que sirven a los aviones comerciales y 7,500 m para los aeropuertos de transporte básico y transporte general.



PERFIL DE PISTA.

Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

³ OACI. Organización de Aviación Civil Internacional. (International Civil Aviation Organization)

⁴ FAA. Administración Federal de Aviación. (Federal Aviation Administration)

II.6 Longitud

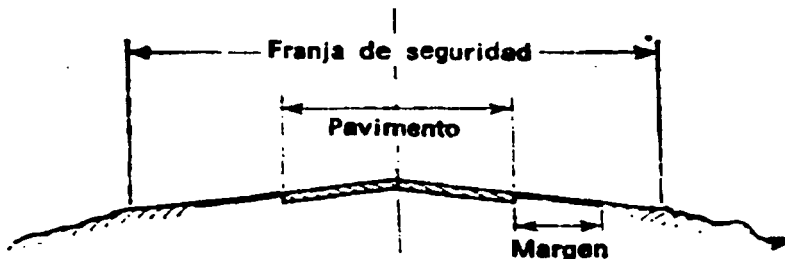
Resulta difícil especificar las longitudes de pista para las diferentes clases de aeropuertos, ya que la longitud depende de muchos factores. Algunos de los más importantes son: los comportamientos aerodinámicos de cada avión en despegue y aterrizaje, peso de despegue y aterrizaje de las etapas, elevación, temperatura del aeropuerto y pendiente de la pista.

Si se puede determinar la longitud de pista requerida al nivel del mar y en condiciones tipo, la OACI en el Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, proporciona las correcciones correspondientes a esta longitud debidas a la altitud del aeropuerto, temperatura y pendiente de la pista. Se debe recalcar que estas correcciones son aproximadas y que la mejor fuente de información es la referida en los manuales de vuelo. Las pistas deberán tener la longitud suficiente para poder acomodar los aviones que requieren la mayor longitud con mayores frecuencias.

Las longitudes de pista de referencia para las diferentes categorías de la OACI se pueden observar en la tabla que se encuentra en la página 21, de este capítulo.

II.7 Calles de rodaje

Anchuras y pendientes. Ya que las velocidades de los aviones en las calles de rodaje son menores que en las pistas, los criterios que rigen las pendientes longitudinales, las curvas verticales y la distancia visible no son tan exigentes como las de pistas; incluso las pequeñas velocidades permiten que el ancho de las calles de rodaje sea menor que el de la pista de aterrizaje.

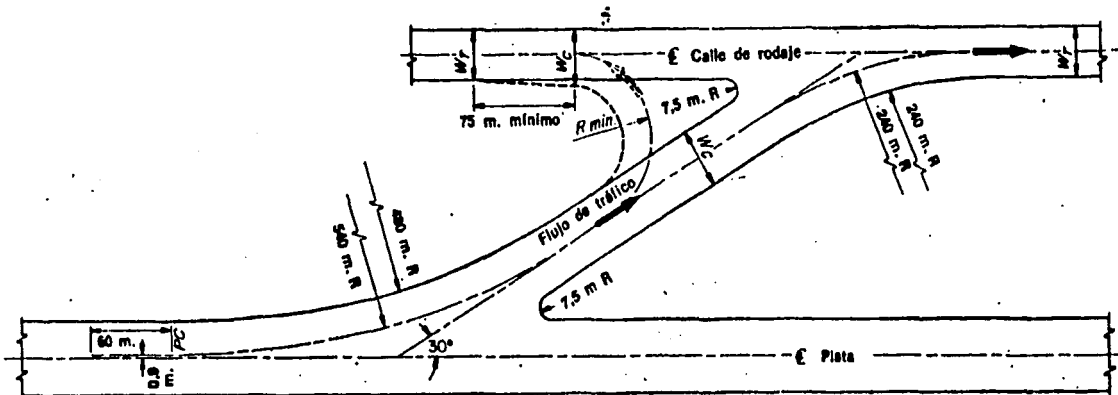


SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CALLE DE RODAJE.

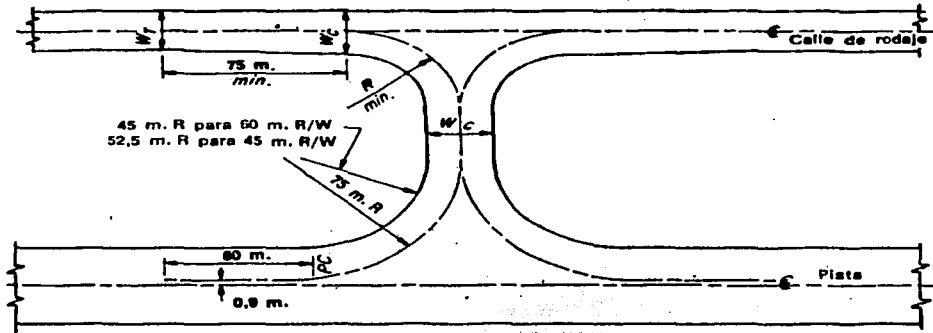
Distancia visible y perfil longitudinal. Al igual que en las pistas de vuelo, el número de cambios en el perfil longitudinal está limitado por la distancia mínima entre curvas verticales. Con respecto a la distancia visible, la OACI exige que la superficie de la calle de rodaje deberá verse a una distancia de 300 m desde un punto situado a 3 m por encima de la calle de rodaje, en los aeropuertos de categoría A, B y C. Para los que son categoría D y E las dimensiones equivalentes son 250 y 2 m.

Geometría de las calles de rodaje. La función de las calles de rodaje de salida de pista, es la de minimizar el tiempo de ocupación de la pista por parte de los aviones que aterrizan. Estas salidas pueden situarse formando ángulo recto, un ángulo de más de 90° u otro menor con la pista. Cuando el ángulo es del orden de los 30° , se utiliza frecuentemente el término de *salida a alta velocidad* o *salida rápida*, para indicar que esa salida se ha proyectado para mayores velocidades que otras configuraciones de calles de salida de pista.

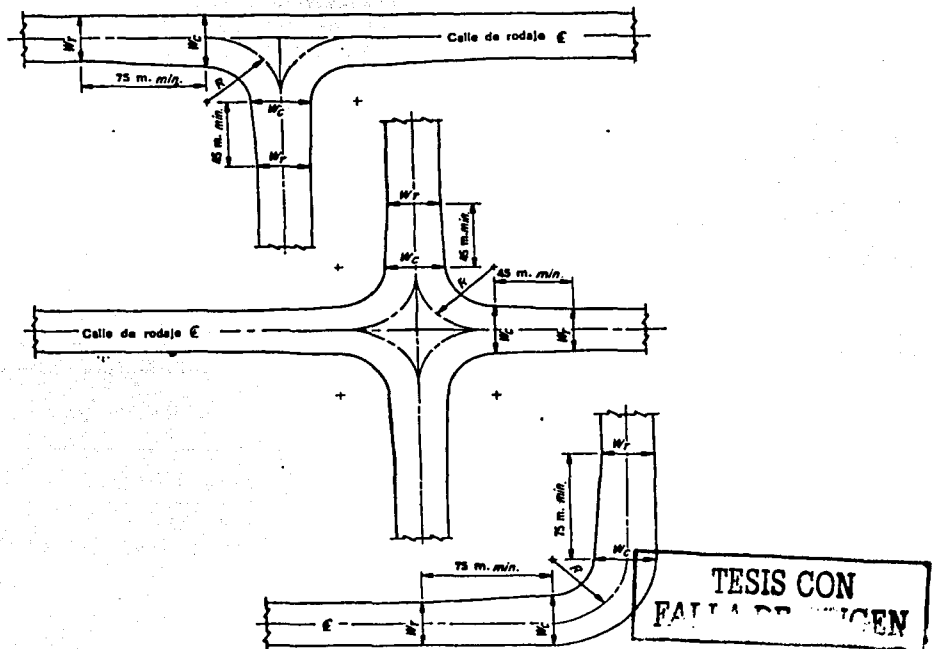
A continuación se muestran dos tipos de calles de salida, una a 30° y otra con un ángulo recto a 90° , así como detalles de las intersecciones entre ellas.



CALLE DE RODAJE A 30° .
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.



CALE DE RODAJE A 90°.
 Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.



INTERSECCIONES DE CALLES DE RODAJE.
 Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Donde:

- W_e : ancho de la calle de rodaje antes de la curvatura.
- W_c : ancho de la calle de rodaje en el radio de curvatura.
- R : radio de curvatura.

Situación de las calles de salida de pista. La ubicación de estas salidas depende en gran parte de:

- a. La combinación de aviones.
- b. Las velocidades de aproximación y contacto con el pavimento.
- c. La velocidad de salida.
- d. La estimación de la desaceleración, que a su vez durante el giro depende del estado de la superficie del pavimento (seco o húmedo)
- e. El número de salidas.

Aunque se han realizado análisis que resultan útiles para suministrar un mayor conocimiento de los parámetros importantes que afectan dicha ubicación, su utilidad ha quedado limitada a causa de los análisis y los datos que se requieren para la aplicación de los modelos. Como resultado de ello, se emplean generalmente métodos más simplificados.

El proceso de aterrizaje puede describirse de la siguiente manera: el avión cruza el umbral de la pista a una altura de 15 m de los ojos del piloto y desacelera en el aire hasta que el tren de aterrizaje principal toca la superficie del pavimento. En este punto el tren de proa todavía no ha tomado contacto con la pista. Pueden transcurrir hasta tres segundos para que esto ocurra y no puede aplicarse ninguna forma de frenado hasta que el tren de proa haya hecho contacto con el pavimento, cuando lo haga, se utiliza la técnica de frenado por retroempuje, por frenado de las ruedas o ambas, para reducir la velocidad de avance hasta llegar a la velocidad de salida.

En el procedimiento simplificado, se supone que un avión ha tocado el suelo a 1.3 veces la velocidad de pérdida para un peso de aterrizaje que corresponde al 85% del peso máximo estructural al aterrizaje. En lugar de calcular la distancia desde el umbral hasta la zona de toma de contacto con el suelo, las distancias a las líneas de contacto se suponen como valores fijos para ciertos tipos de aviones. A estas distancias hay que sumarles las distancias de desaceleración que se requieren para alcanzar la velocidad de salida.

Diseño de curvas entre calles de rodaje. Originalmente los diseños básicos de curvas de enlace para los tres tipos más comunes de intersección de calles de rodadura pueden verse en la figura anterior denominada *detalles de intersecciones*, de acuerdo a recomendaciones de la FAA.

El Anexo 14 especifica los radios mínimos de estas curvas, que dependen del ángulo de intersección de las calles de rodaje y de la distancia entre ejes del aeronave.

II.8 Márgenes de separación

La separación entre las pistas paralelas depende de varios factores, tales como si las operaciones se efectúan en VFR o IFR y en este último caso, de si se desea por ejemplo, tener una capacidad simultánea de llegadas y salidas. En aquellos aeropuertos que sirven indistintamente a aviones pesados y ligeros, el uso simultáneo de las pistas, incluso en condiciones VFR, puede quedar sujeto a disposiciones de separación con objeto de salvaguardar los efectos de la estela.

Para las calles de rodaje, con el objeto de disponer de un margen de seguridad en las áreas operacionales del aeropuerto, las vías de tránsito deben estar separadas una de otra suficientemente así como de las obstrucciones adyacentes.

III. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO Y DESIGNACIÓN DE PISTAS.

Para la determinación del número y orientación de las pistas, se deben tomar en cuenta tres factores principales, que son:

- a. Capacidad de pistas.
- b. Meteorología del lugar en donde se va a ubicar el aeropuerto, con un análisis de los vientos en el lugar, ya que debido a que este tipo de fenómenos son cíclicos, se debe tener un registro mínimo de 5 años para tener una muestra aceptable.
- c. Espacios Aéreos.

III.1 Capacidad.

La capacidad es un índice del funcionamiento y aptitud del aeropuerto, puesto que se compara la capacidad con la demanda existente y prevista para un futuro y así, determinar si se necesitarían introducir mejoras para incrementar dicha capacidad. Comparar la capacidad de la zona aeronáutica según diferentes configuraciones ayuda a determinar cuales son las más eficientes. Por otro lado, la demora es un factor importante en un análisis de costo-beneficio, ya que al dársele un valor monetario a la demora, los ahorros que se produzcan al reducirlas, como consecuencia de una mejora, se convierten en un beneficio que compensa el costo mismo de ésta.

Los modelos matemáticos de las operaciones de un aeropuerto son útiles para comprender los parámetros esenciales que influyen sobre el funcionamiento del sistema y para investigar las interdependencias específicas del mismo que resultan de especial interés.

La capacidad de la zona aeronáutica, para su planificación, se ha definido de dos modos diferentes:

- a. La capacidad práctica es el número de operaciones durante un intervalo de tiempo específico, correspondiente con un nivel tolerable de demora media.
- b. La capacidad máxima es el número máximo de operaciones que pueden aceptarse durante un intervalo de tiempo específico, cuando existe una demanda continua del servicio sin tomar en cuenta el retraso. La demanda continua de servicio significa que siempre existen aeronaves preparadas para despegar o aterrizar.

Una diferencia importante entre las dos definiciones mencionadas es que una incluye el concepto de demora y la otra no. La inclusión de este concepto en la

definición de capacidad, origina algunas interrogaciones ya que la magnitud de la demora está influida por la pauta que marca la demanda, como distribución de llegadas y salidas y tipos de aviones.

III.1.1 Factores que afectan la capacidad.

En general la capacidad depende de:

- a. La configuración de la zona aeronáutica.
 - Especialmente del número de pistas, su separación, orientación y longitud.
 - Diferentes tamaños de aviones que utilizan las instalaciones.
 - Configuración y número de las calles de rodaje.
 - Tiempo de ocupación de la pista, para operaciones mixtas.
 - Disposición, tamaño y número de posiciones de estacionamiento de aviones en las plataformas.

- b. El medio ambiente en el que opera el avión.
 - Operaciones VFR o IFR.
 - Condiciones atmosféricas, principalmente techo y visibilidad.
 - Viento.
 - Procedimientos para reducir el ruido.
 - Estrategia de los controladores para las operaciones en las pistas.
 - Número de llegadas en relación con el número de salidas.
 - Torbellinos de estela.

- c. La disponibilidad de ayudas a la navegación y de los medios de control del tránsito aéreo.
 - Disponibilidad de radioayudas, ILS⁵, VOR⁶, DME⁷, RADAR⁸.
 - Disponibilidad de espacio aéreo para establecer rutas de llegada y salida.
 - Naturaleza y alcance del sistema de control de tránsito aéreo.

El factor más importante que afecta la capacidad de la pista de aterrizaje, es la separación entre los aviones sucesivos, que depende a su vez de las apropiadas reglas de tránsito aéreo. Que están en función de las condiciones atmosféricas y del tamaño de las aeronaves.

⁵ ILS. Sistema de Aterrizaje por Instrumentos. (Instrument Landing System)

⁶ VOR. Radio Omni Direccional de Alta Frecuencia. (Very High Frequency Omni Directional Radio)

⁷ DME. Equipo para Medir Distancias. (Distance Measuring Equipment)

⁸ RADAR. Detector de Radio y Rango. (Radio Detection and Range)

III.1.2 Determinación de la capacidad que esta en relación con la demora.

Para definir la capacidad se utilizan dos intervalos de tiempo: horas y años. El primero se conoce como PHOCAP⁹ y el segundo como PANCAP¹⁰. La PHOCAP se define como el número de movimientos de aviones que las pistas pueden acoger a un nivel aceptable de demora. Tal y como se indica en la siguiente tabla, esta es una de las clasificaciones de aviones que se utiliza al aplicar criterios para determinar el nivel de demora medio tolerable.

Clase	Tipo de avión.
A	Boeing series 707, 747, 720. Douglas series DC-8 y DC-10. Lockheed series L-1011.
B	Boeing series 727 y 737. Douglas DC-9. BAC-111. Todos los grandes aviones comerciales de émbolo y turbohélices.
C	Pequeños aviones comerciales de hélice como el Fairchild F-27 y reactores de negocios.
D	Aviones de aviación general con dos motores de hélice general y algunos modelos grandes de un solo motor.
E	Aviones de aviación general con un solo motor de hélice.

Fuente: Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

La PANCAP es una ampliación del concepto PHOCAP y permite que la zona aeronáutica se vea sobrecargada por cortos períodos de tiempo a lo largo del año. Una sobrecarga se define como el período de tiempo en el cual la demanda excede la capacidad PHOCAP.

En los aeropuertos importantes con gran cantidad de turboreactores, la sobrecarga se define como el período de tiempo en el que la demora media es superior a los cuatro minutos en operaciones IFR. El espacio de tiempo durante el cual se permite esta sobrecarga se ha seleccionado empíricamente, teniendo en cuenta las observaciones de campo y puede cambiarse cuando sea necesario. Cuando se desarrolló la capacidad PANCAP, ésta se definió como el nivel de operaciones anuales en el que ocurre la sobrecarga, para un 10% de las operaciones de las aeronaves o para un 5% del tiempo, tomándose el que produce el número más bajo de operaciones anuales. La demora media durante los períodos de sobrecarga no debe exceder los ocho minutos.

⁹ PHOCAP. Capacidad Práctica Horaria. (Practical Hourly Capacity)

¹⁰ PANCAP. Capacidad Práctica Anual. (Practical Annual Capacity)

III.2 Meteorología.

III.2.1 Temperatura ambiente.

La longitud de pista es proporcional a la temperatura, debido a que al aumentar la temperatura se reduce la densidad del aire. Este incremento puede expresarse como porcentaje de longitud de pista a 15° C, que es la temperatura estándar al nivel del mar. En el rango entre los 15° C y los 32° C la longitud de pista se incrementará entre un 0.76% y 1.17% por cada grado centígrado respecto a la longitud requerida en el caso de 15° C. Sin embargo, a los 29° C la longitud de pista deberá incrementarse en un rango entre el 11% y el 18% con respecto a la requerida a 15° C. (estos porcentajes son aproximados y tienen un valor exclusivamente estimativo)

Para el cálculo de la longitud de pista en el proyecto se puede utilizar la temperatura de referencia del aeropuerto que el Anexo 14 la define como la temperatura media mensual de las temperaturas medias diarias en el mes más caluroso del año, siendo el mes más caluroso aquél que reporta la mayor temperatura media diaria, más un tercio de la diferencia entre la temperatura media de ese mes y la media mensual de las temperaturas máximas diarias del mismo mes.

III.2.2 Elevación sobre el nivel del mar.

La longitud de pista en despegue y aterrizaje varía en proporción directa a la elevación. A mayor elevación, mayor longitud de pista y viceversa. Aunque tal incremento no es lineal con la altitud, para propósitos de planeación preliminar puede considerarse un incremento de 7% por cada 300 m, con excepción de aeropuertos ubicados a grandes altitudes y/o temperaturas de referencia elevadas.

III.2.3 Pendiente de la pista.

La longitud de pista en despegue depende de la magnitud y sentido de su pendiente. Ésta se define como efectiva que es la diferencia entre el punto más alto y más bajo de la línea central de la pista dividida entre la longitud total, si la operación se realiza en sentido positivo (hacia arriba) se requiere mayor longitud de pista de despegue, mientras que si es negativa (hacia abajo) la longitud de despegue será menor. Para los aterrizajes, los resultados se invierten.

III.2.4 Condiciones de la superficie de la pista.

La presencia de algún contaminante (agua, agua-nieve lodosa, aceite, lodo, agua con hule, nieve con agua, hielo, etc) en la superficie de la pista, se tiene un efecto indeseado en la operación de aeronaves conocido como hidroplaneo, que consiste

en que las llantas se deslizan sobre la superficie, lo que provoca que disminuya la eficiencia en el frenado, o bien, imposibilitan la aceleración en el despegue.

Este fenómeno ha sido analizado de tal manera que se consideran diversos parámetros, como el espesor y densidad de la capa contaminante, el grado de contaminación de la pista y presión de inflado de la llanta. Para el caso de aviones de turbina, la capa contaminante no deberá exceder los 13 mm de espesor. Entre los 13 y 6 mm de espesor, el peso de despegue debe ser disminuido sustancialmente, por esto es importante proveer un drenaje adecuado a la pista para desalojar rápidamente el agua o cualquier otro contaminante existente.

III.2.5 Vientos.

Para planificar la orientación de pistas, resulta esencial un análisis de los vientos. Como regla general, la pista principal de un aeropuerto debe estar orientada lo más próximo posible a la dirección de los vientos dominantes. En los aterrizajes y despegues, las aeronaves son capaces de maniobrar sobre una pista, mientras que la componente en ángulo recto con la dirección del eje de la pista (viento normal o lateral) no sea excesiva. El viento máximo de costado permisible depende no solamente del tamaño del avión, sino también de la configuración de las alas y de las condiciones de la superficie del pavimento.

Para todos los aeropuertos, tanto la OACI como la FAA exigen que las pistas estén orientadas de tal manera, que las aeronaves puedan aterrizar por lo menos el 95% de las veces con la componente normal que no exceda una velocidad adoptada. La OACI especifica que las pistas deben orientarse de tal manera para que los aviones puedan aterrizar por lo menos el 95% de las veces con componentes de viento normal que no excedan los 37 km/h (20 nudos) cuando se trata de aviones cuya longitud de referencia es de más de 1,500 m o más; 24 km/h (13 nudos) en el caso de aviones cuya longitud de campo de referencia es de 1,200 m o mayor de 1,200 m o menor de 1,500 m y 19 km/h (10 nudos) en el caso de aviones cuya longitud de referencia es inferior a los 1,200 m.

Después de seleccionado el máximo permisible de la componente normal, se puede determinar la dirección de las pistas según la del viento, examinando las características del mismo con las siguientes condiciones:

- a. Cobertura de la pista sin tener en cuenta la visibilidad o el techo. (altura de la base de las nubes)
- b. Características de los vientos cuando el techo de nubes se encuentra entre 60 y 300 m y/o la visibilidad se encuentra entre 800 y 4,800 m.

La primera condición representa la gama completa de visibilidad, desde excelente hasta muy poca. La otra condición, representa los diferentes grados de poca visibilidad, lo cual requiere el uso de instrumentos para el aterrizaje. El criterio del

95% sugerido por la OACI y la FAA es aplicable a todas las condiciones meteorológicas, sin embargo, resulta útil examinar los datos por partes cuando ello sea posible.

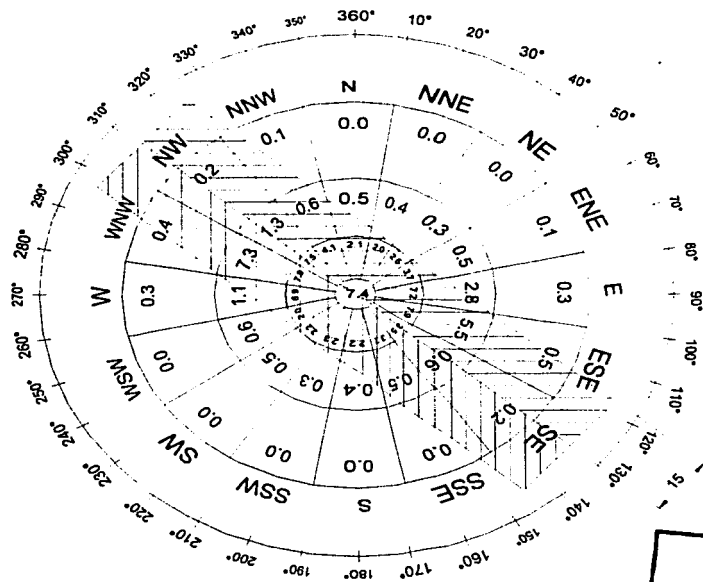
III.3 Rosa de Vientos Cruzados.

Para determinar la orientación adecuada de una pista se utiliza el método gráfico de la Rosa de Vientos Cruzados que toma en consideración el régimen de vientos registrados en el lugar donde se construirá el aeropuerto durante un cierto período de tiempo, tan largo como sea posible, preferentemente como mínimo durante los últimos 5 años. Los datos de viento, se agrupan en una tabla de acuerdo a la velocidad, dirección y ocurrencia expresada en porcentaje, del período de tiempo registrado como se muestra en el siguiente ejemplo.

Sector	Velocidad del viento (m/h)			Total
	4-15	15-30	>30	
N	2.1	0.5	0.0	2.6
NNE	2.0	0.4	0.0	2.4
NE	2.6	0.3	0.0	2.9
ENE	3.7	0.5	0.1	4.3
E	7.2	2.8	0.3	10.3
ESE	7.9	5.5	0.5	13.9
SE	3.5	0.6	0.2	4.3
SSE	3.2	0.5	0.0	3.7
S	2.2	0.4	0.0	2.6
SSW	2.3	0.3	0.0	2.6
SW	2.2	0.5	0.0	2.7
WSW	2.0	0.6	0.0	2.6
W	6.9	1.1	0.3	8.3
WNW	7.9	7.3	0.4	15.6
NW	7.5	1.3	0.2	9.0
NNW	4.1	0.6	0.1	4.8
Calma	7.4 (0-4 m/h)			7.4
Total				100%

Nota: Los datos se encuentran en porcentajes

Estos datos se colocan en una gráfica llamada rosa de vientos cruzados, situando los porcentajes en el segmento apropiado de la gráfica. En la rosa de vientos, los círculos representan la velocidad del viento en millas por hora, y las líneas radiales indican la dirección del viento, tal y como se muestra en la figura siguiente:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Rosa de vientos cruzados con los porcentajes de vientos de la tabla anterior.

El método de la rosa de vientos cruzados permite hacer uso en forma manual de una tira de papel transparente en donde se dibujan tres líneas paralelas, donde la línea central representa el eje central de la pista, y la distancia entre cada una de las líneas exteriores es la componente de viento transversal permisible adoptada.

Para determinar la orientación adecuada y el factor de utilización del aeropuerto se efectúan una serie de pasos, a través de los cuales, se obtiene el ángulo que determinará la orientación de la pista. Es importante destacar, que la dirección de los datos de viento se registran con base en el norte verdadero, mientras que la orientación y designación de pistas se basa en el norte magnético.

Determinando el ángulo de orientación de pista para el ejemplo que se mostró en la tabla y la figura anterior, se tiene que este es: $93.76 \cong 93^{\circ}45'36''$.

III.4 Designación de pistas

Para la designación de las pistas, y conociendo la orientación de éstas, se utilizan las siguientes tres reglas internacionales:

- a. Redondear la cifra de la orientación a los 10° más próximos, hacia arriba o hacia abajo. Por ejemplo: $132^\circ 35' \approx 130^\circ 00'$
- b. Si este ángulo anterior es superior a los 100° , se le eliminará un cero (0). $130^\circ \Rightarrow$ será la pista 13.
- c. En sentido contrario de operación, el azimut será de $180^\circ + \text{ángulo}$, y se le aplica también la regla anterior. Para el mismo ejemplo, $180^\circ + 130^\circ = 310^\circ \Rightarrow$ pista 31.

Por lo que para el ejemplo la pista se DESIGNA: 13-31.

IV. CÁLCULO DE LA LONGITUD.

En el presente capítulo, se mencionan los dos métodos para poder obtener la longitud de las pistas, que son:

- a. Método de las correcciones.
- b. Método de los manuales de vuelo.

Ambos métodos son aceptados por la OACI, por lo que resulta conveniente siempre tomar en cuenta, que datos se tienen respecto al proyecto y así poder determinar cual es el método más apropiado a aplicar en una área específica para desarrollar el proyecto de pista.

Las longitudes de pista, requieren reportarse en *distancias declaradas*, tal y como se menciona a continuación.

La introducción de zonas de parada y de zonas libres de obstáculos, así como la utilización de umbrales desplazados en las pistas, han creado la necesidad de disponer de información precisa que se ha de declarar con respecto a las diferentes distancias físicas disponibles y adecuadas para el aterrizaje y el despegue de los aviones. Para poner de manifiesto esta necesidad con un sentido inteligible, se emplea el término *distancias declaradas*, con las cuatro distancias siguientes asociadas a una determinada pista.

- a. Recorrido de Despegue Disponible (TORA¹¹). Longitud de pista que se ha declarado disponible y adecuada para el recorrido en tierra de un avión que despegue.
- b. Distancia de Despegue Disponible (TODA¹²). Longitud de recorrido de despegue disponible, más la longitud de la zona libre de obstáculos hasta una altura especificada.
- c. Distancia de Aceleración de Parada (ASDA¹³). Longitud de recorrido desde el inicio del despegue, acelerando con todos los motores hasta V_1 (Velocidad de decisión) y después abandonar el despegue y llegar a una velocidad cero.
- d. Distancia de Aterrizaje Disponible (LDA¹⁴). Longitud de la pista que se ha declarado disponible y adecuada desde el umbral y el recorrido en tierra de un avión que aterrice.

Si la pista no está provista de una zona de parada (SWY¹⁵) ni de una zona adicional libre de obstáculos (CWY¹⁶) y además los umbrales están situados en los

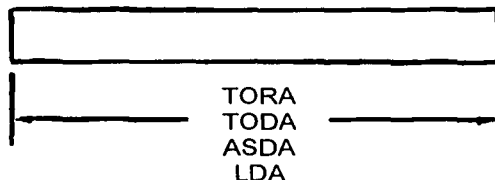
¹¹ TORA: Take Off Runway Available.

¹² TODA: Take Off Distance Available.

¹³ ASDA: Accelerate Stop Distance Available.

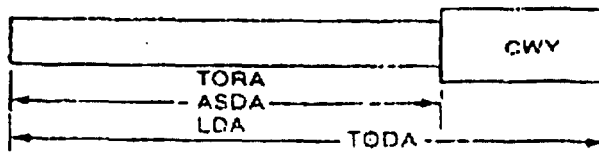
¹⁴ LDA: Landing Distance Available.

extremos de la pista, las cuatro distancias declaradas tendrán una longitud igual a la de la pista, tal y como se muestra en la figura.



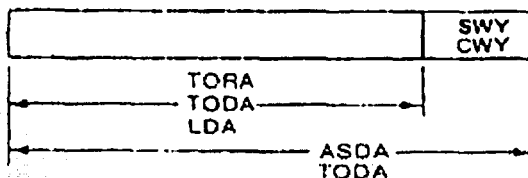
TODAS LAS DISTANCIAS DECLARADAS EN LA LONGITUD DE PISTA.
 Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Si la pista está provista de una zona libre de obstáculos (CWY), entonces en la TODA se incluirá la longitud de la zona libre de obstáculos, según se indica en la siguiente figura, con la operación de izquierda a derecha.



DISTANCIA DECLARADA CON ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS.
 Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Si la pista está provista de una zona de parada (SWY), entonces en la ASDA se incluirá la longitud de la zona de parada, como se muestra en la siguiente figura.

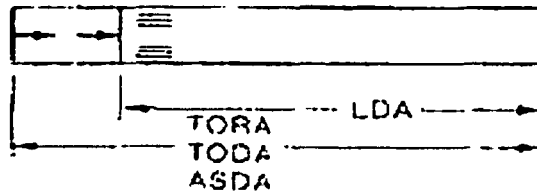


DISTANCIA DECLARADA CON ZONA DE PARADA Y ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS.
 Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

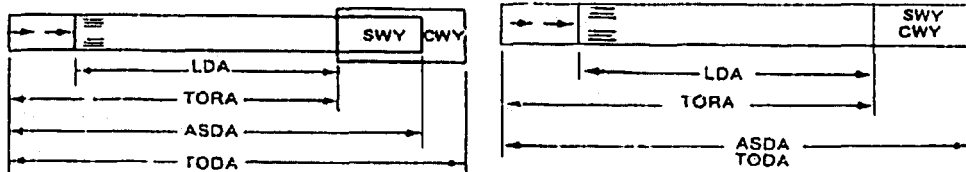
¹⁵ SWY: Stop way.
¹⁶ CWY: Clearway.

Si la pista tiene el umbral desplazado, entonces en el cálculo de la LDA se restará de la longitud de pista, la distancia a la cual se haya desplazado el umbral, como se muestra en la siguiente figura.



DISTANCIA DECLARADA CON UMBRAL DESPLAZADO.
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Si ocurren más de una de estas características, habrá más de una modificación en las distancias declaradas, pero se seguirá el mismo principio. En las siguientes figuras se presentan dos ejemplos en los que ocurren todas estas características.



MODIFICACIÓN DE LAS DISTANCIAS DECLARADAS CON MÁS DE UNA COMBINACIÓN.
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

IV.1 Método de Correcciones de Longitud de Pista por Elevación, Temperatura y Pendiente.

Cuando no se cuenta con el manual de vuelo adecuado, la longitud de pista debe determinarse aplicando factores de corrección generales. Como primera medida se debe tomar en cuenta para la pista, la longitud de campo de referencia que permita atender los requisitos operacionales del avión, los cuales son proporcionados por el fabricante de éste. Dicha longitud, es aquella que se utiliza con fines de planificación de aeropuertos y que es necesaria para el despegue o el aterrizaje en condiciones que correspondan a la atmósfera tipo, a la elevación cero (nivel del mar), pendiente de pista nulo y viento calma.

Las correcciones aplicables a la longitud de campo de referencia son las siguientes.

- a. La longitud de campo de referencia del avión seleccionado, deberá aumentarse a razón del 7% por cada 300 m de elevación, para lo que se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$L_{elev} = L_{campo\ de\ ref} + \left(L_{campo\ de\ ref} \times 0.07 \frac{elevación}{300} \right)$$

- b. La longitud de la pista determinada en el punto anterior, deberá aumentarse a su vez, a razón del 1% por cada °C que la temperatura de referencia¹⁷ del aeropuerto exceda a la temperatura de la atmósfera tipo correspondiente a la elevación del aeropuerto, utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{temp} = L_{elev} + (L_{elev} \times 0.01 [Temp\ ref - Temp\ atm\ estd])$$

- c. Una vez que se obtiene la longitud por corrección de temperatura, se tiene que realizar una comparación en la que esta longitud no exceda el 35% adicional a la longitud de campo de referencia, tal y como se muestra a continuación, de lo contrario el método no es aplicable.

$$L_{temp} \leq 1.35 L_{campo\ de\ ref}$$

- d. Cuando la longitud de campo de referencia del avión determinada por los requisitos del despegue sea inferior al 35%, dicha longitud deberá a su vez aumentarse a razón de un 10% por cada 1% de pendiente de pista, calculándola de la siguiente forma:

$$L_{pend} = L_{temp} + [L_{temp} \times 0.1 (pendiente\ efectiva)]$$

- e. Una vez realizadas las correcciones anteriores, se realiza la corrección para longitud de aterrizaje para compararla con la longitud obtenida en el inciso d. Es aquí en donde se toma la mayor longitud.

¹⁷ Temperatura de Referencia. Capitulo III, página 31.

A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación del método de las Correcciones de Longitud de Pista.

Longitud de pista requerida para aterrizar a nivel del mar en condiciones de atmósfera tipo.	2,100 m
Longitud de pista requerida para despegar en un emplazamiento plano situado al nivel del mar en condiciones de atmósfera tipo.	1,700 m
Elevación del aeropuerto	150 m
Temperatura de referencia del aeropuerto	24 °C
Pendiente de la pista.	0.5 %

Las correcciones que se aplican son las siguientes:

- a) Longitud corregida por elevación, para despegue.

$$L_{elev} = 1,700 + \left(1,700 \times 0.07 \times \frac{150}{300} \right) = 1,760 \text{ m.}$$

- b) Longitud corregida por elevación y temperatura, para despegue.

Obteniendo la temperatura a 150 m en la atmósfera tipo:

Gradiente de la temperatura atmosférica estándar:

$$[0.0065 \text{ °C/m}][150 \text{ m}] = 0.975 \text{ °C}$$

$$T_{atm\ est} = T_o - 0.975 = 15 \text{ °C} - 0.975 \text{ °C} = 14.025 \text{ °C}$$

Entonces , sustituyendo en la ecuación nos queda:

$$L_{temp} = 1,760 + [1,760 \times 0.01 \times (24 - 14.025)] = 1,936 \text{ m.}$$

- c) Revisión para la longitud de campo de referencia y longitud por temperatura.

$$\frac{1936.00}{1700.00} = 1.14 < 1.35, \text{ por lo que se puede continuar con el método.}$$

- d) Longitud de pista corregida por elevación, temperatura y pendiente, para despegue.

$$L_{pend} = 1,936 + (1,936 \times 0.5 \times 0.10) = 2,035 \text{ m.}$$

- e) Longitud para aterrizaje corregida únicamente por elevación.

$$2,100 + \left(2,100 \times 0.07 \times \frac{150}{300} \right) = 2,175 \text{ m.}$$

- f) Por lo que la longitud efectiva de pista es de **2,175.00 m**. Debido a que es mayor que 2,035 m, que fue la longitud calculada para despegue.

IV.2 Método de Manuales de Vuelo.

IV.2.1 Términos Operacionales.

Para poder examinar la relación entre los parámetros de los aviones y los requisitos de longitud de pista, es necesario definir los siguientes términos operacionales:

- Velocidad de decisión (V_1)*. Es la velocidad escogida por el operador en la cual se supone que el piloto, al percatarse del fallo del grupo de motor crítico, decide proseguir el despegue o iniciar la aplicación del primer dispositivo retardador. Si el fallo de motores ocurre antes de alcanzarse la velocidad de decisión, el piloto deberá parar, si el fallo ocurre después, el piloto no debe detenerse, sino proseguir con el despegue.
- Velocidad segura de despegue (V_2)*. Es la velocidad mínima de ascenso seguro para mantener por lo menos la pendiente ascensional mínima requerida sobre la superficie de despegue, durante el mismo con un grupo de motor inactivo. La V_2 se puede alcanzar en tierra o inmediatamente después del despegue del tren principal de aterrizaje.
- Velocidad de rotación (V_R)*. Es la velocidad en la que el piloto inicia la rotación del avión a fin de levantar el tren de aterrizaje de proa, e incrementar el ángulo de ataque de las alas.
- Velocidad en el punto de despegue (V_{LOF})*. Es la velocidad expresada como la velocidad aérea calibrada, en la cual el avión entra en sustentación teórica en el aire.

IV.2.2 Longitud de Despegue Requerida por los Aviones.

Las limitantes de utilización de aviones requieren que se disponga de una longitud suficiente para asegurar que, después de iniciar el despegue, pueda detenerse con seguridad o concluir el despegue sin peligro. Para fines de cálculo, se supone que la longitud de la pista, de la zona de parada o de la zona libre de obstáculos que se disponga en el aeropuerto es suficiente para cualquier tipo de avión que requiera las mayores distancias de despegue y de la aceleración-parada, teniendo

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**

en cuenta su masa de despegue, las características de la pista y las condiciones de elevación y atmosféricas del lugar. Bajo estas circunstancias, para cada despegue existe una velocidad V_1 .

Por otro lado, si un motor falla después de haberse alcanzado la velocidad de decisión, el avión tendría la velocidad y potencia suficientes para concluir el despegue con seguridad en la distancia de despegue disponible restante, ya que debido a la gran velocidad, no sería posible detener el avión en la distancia de aceleración-parada disponible restante.

La velocidad de decisión no es una velocidad fija para un avión y el piloto puede elegirla dentro de los límites compatibles con los valores utilizables de la distancia disponible de aceleración-parada, la masa de despegue del avión, las características de la pista y las condiciones de elevación y atmosféricas del aeropuerto. Se pueden obtener diversas combinaciones de la distancia de aceleración-parada requerida y de distancia de despegue requerida que sean acordes a un determinado avión. Cada una de las anteriores requiere su correspondiente longitud de recorrido de despegue.

Para el proyecto de la pista se recomienda la condición en que la velocidad de decisión es tal, que la distancia de despegue requerida es igual a la distancia de aceleración-parada requerida; este valor se conoce como *longitud de campo compensado* o de *pista balanceada*. Cuando no se dispone de zona de parada ni de zona libre de obstáculos, la longitud de pista no se modifica, aunque si la pista se utiliza para el despegue en ambos sentidos, se debe incluir en cada extremo de la pista una cierta longitud, ya que la velocidad de decisión requiere de una zona libre de obstáculos y/o una zona de parada. (según sea el caso)

La longitud mínima de pista y la longitud máxima de zona de parada o de zona libre de obstáculos que han de proveerse, pueden determinarse como se enuncia a continuación, con base en los valores contenidos en el Manual de Vuelo del avión que se considere crítico desde el punto de vista de los requerimientos de longitud de pista.

- a. Si la zona de parada es viable, las longitudes que han de proveerse son las correspondientes a la longitud de campo compensado.
- b. La longitud de pista es igual a la del recorrido de despegue requerido, o a la distancia de aterrizaje requerida, si ésta es mayor.
- c. Debe proveerse también de una zona libre de obstáculos de la misma longitud que la zona de parada.
- d. El exceso de la distancia de despegue requerida respecto a la longitud de pista, puede proveerse como zona adicional libre de obstáculos, situada generalmente en cada extremo de la pista.

Pueden dejar de ser económicamente viables las zonas de parada, si cada vez que se utilizan tuvieron que nivelarse y compactarse de nuevo. Por consiguiente,

deberán construirse de manera que puedan resistir un número mínimo de cargas del avión para las cuales están destinadas, sin causar daños estructurales al mismo.

IV.2.3 Requisitos de distancia para el aterrizaje.

Aunque normalmente las distancias de aterrizaje no son críticas, se deben consultar los diagramas de aterrizaje de los aviones para comprobar que los requisitos de longitud de pista para el despegue, garantizan una longitud adecuada para el aterrizaje. Por lo general, la distancia para el aterrizaje se determina de modo que el avión pueda aterrizar después con un margen de seguridad, librando todos los obstáculos situados en la trayectoria de aproximación con la seguridad de que podrá detenerse sin peligro. Se tendrán en cuenta las variaciones previstas en las técnicas de aproximación y aterrizaje de determinadas aeronaves si no se tomaron en cuenta al indicar los datos relativos a las características del avión.

Cuando la longitud de pista requerida para el aterrizaje es superior a la requerida para el recorrido de despegue, este factor determinará la longitud mínima de pista requerida.

A continuación se presenta un ejemplo para verificar el cálculo de la longitud de una pista por el método de los manuales de vuelo.

Obtener la longitud de pista necesaria para un Boeing 747 con los datos que a continuación se tienen:

Elevación	1220 m (4000 ft)
Temperatura de referencia	20° C
Pendiente de Pista	1.00 %
Peso de aterrizaje	220,000 Kg.
Peso de combustible a destino	65,000 Kg.
Peso de combustible alterno más reserva	5,000 Kg.
Peso de operación	170,000 Kg.
Viento	calma

Calcular:

- a. Pesos máximos de despegue autorizados o permisibles.

Utilizando las gráficas del manual de operaciones para el comportamiento de despegue, que se presentan al final de este capítulo en las páginas 46 - 53, para el Boeing 747, se obtienen los siguientes datos.

Aletas / motores	Seco	Húmedo
20°	280,000 kg	294,000 kg
10°	293,000 kg	308,000 kg

- b. Longitudes de pista a pesos máximos de despegue.

	Seco	Húmedo
20°	3050 m	3200 m
10°	3700 m	3950 m

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Nota: con pesos máximos autorizados, a mayor peso, mayor longitud de pista.

- c. Peso real de despegue.

$$\text{Peso real de despegue} = 220,000 + 65,000 = \mathbf{285,000.00 \text{ kg}}$$

- d. Peso de carga de paga.

Peso de aterrizaje.	220,000
Combustible de reserva.	- 5,000
Peso.	215,000
Peso de operación seco.	<u>-170,000</u>
Peso de carga de paga.	45,000 kg

e. Determinación de restricciones.

Para definir las restricciones se compara el peso real de despegue con los máximos autorizados (inciso a), donde se observa que existe una restricción para 20° seco, ya que 285,000 Kg. > 280,000 Kg.

Por lo tanto **no se puede despegar con 20° - seco.**

f. Longitudes de pista a peso real de despegue.

	Seco	Húmedo
20°		2900 m
10°	3450 m	3300 m

g. Considerando la longitud obtenida en el inciso anterior (3,450 m), obtener el peso real de despegue para un DC-10, con motores CF6-6D; protección contra hielo apagada y aletas 5° y 15°. (gama de posibilidades [0° - 25°])

Para este inciso (en ambos puntos respectivamente), se utilizan las gráficas de manuales de vuelo para un DC - 10 con motores y protección contra hielo, las cuales se presentan al final de este capítulo en las páginas 54 y 55.

- Se tiene una limitación por segundo segmento con ice protection OFF /
 $T_{ref} = 20^{\circ} C$ / Altitud 4000 ft.

5° - 408,000 lb

15° - 380,000 lb

- Peso por longitud de pista. Se utiliza la menor longitud de pista del inciso f (2,900 m).

$L = 2,900 \text{ m} = 9514 \text{ ft}$

Obteniendo de los gráficos un valor de 365,000 lb, el cual es menor que 380,000 lb

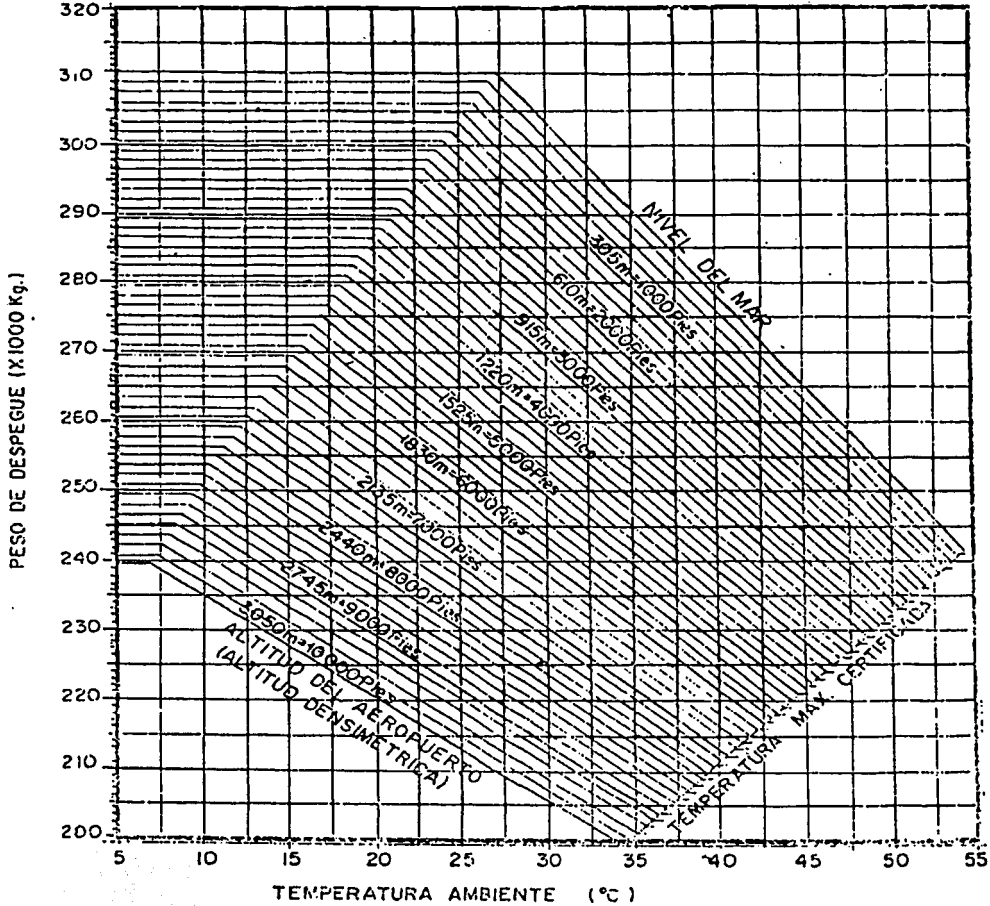
Por lo tanto, el peso de despegue limitado por longitud de pista es de **350,000 lb**

SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.

BOEING - 747
MANUAL DE OPERACIONES.

COMPORTAMIENTO DE DESPEGUE
LIMITACION DE PESO POR ASCENSO.

SECO.
ALETAS 20°

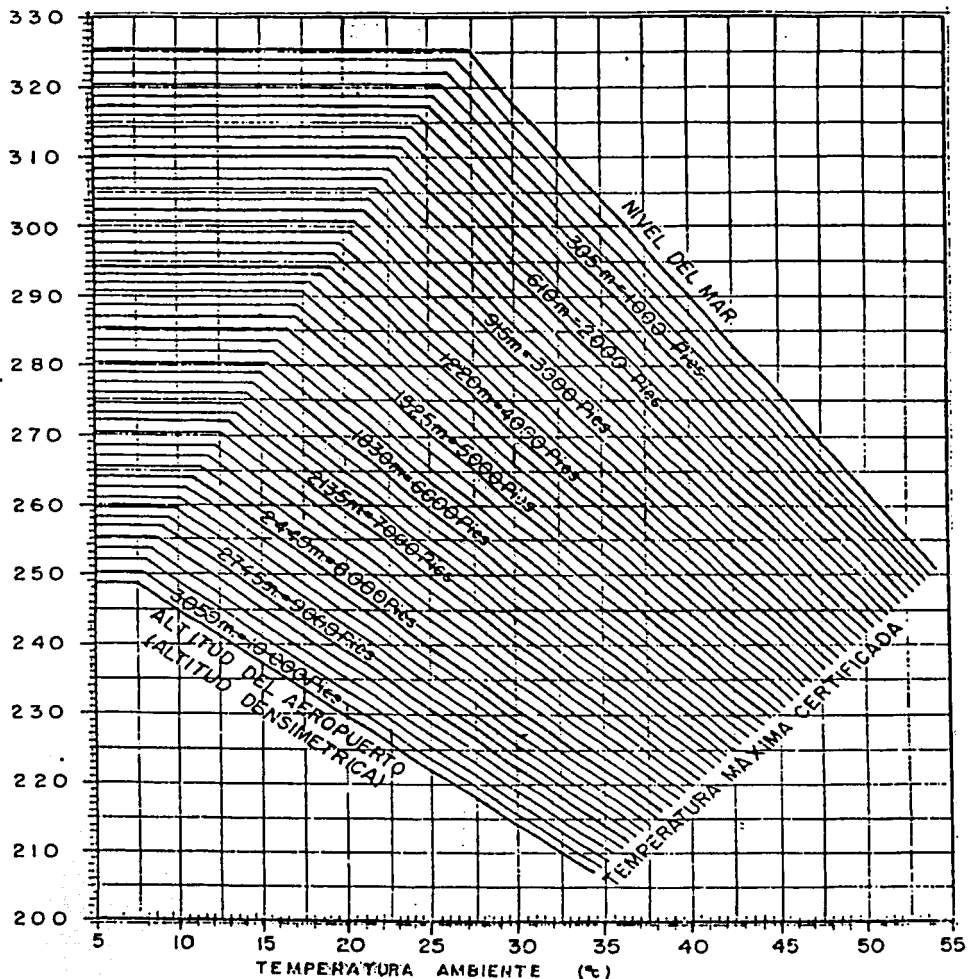


GRÁFICA DE PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS PARA COMBUSTIBLE SECO Y ALETAS 20°.

TESIS CON
FALLA N° ORIGEN

BOEING -747
 MANUAL DE OPERACIONES

COMPORTAMIENTO DE DESPEGUE
 LIMITACION DE PESO POR ASCENSO.
 SECO
 ALETAS 10°



GRÁFICA DE PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS PARA COMBUSTIBLE SECO Y ALETAS 10°.

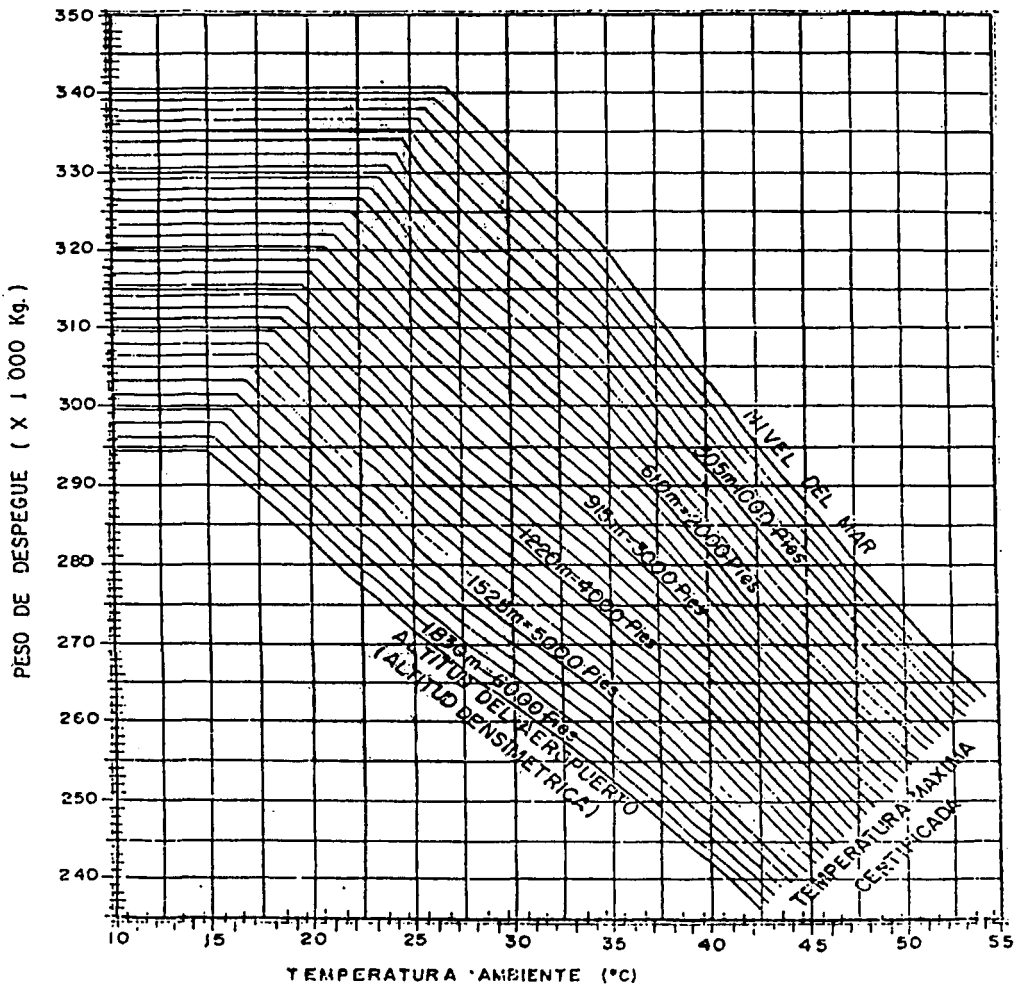
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.

BOEING - 747
MANUAL DE OPERACIONES

COMPORTAMIENTO DE DESPEQUE
LIMITACION DE PESO POR ASCENSO.

HUMEDO
ALETAS 10°



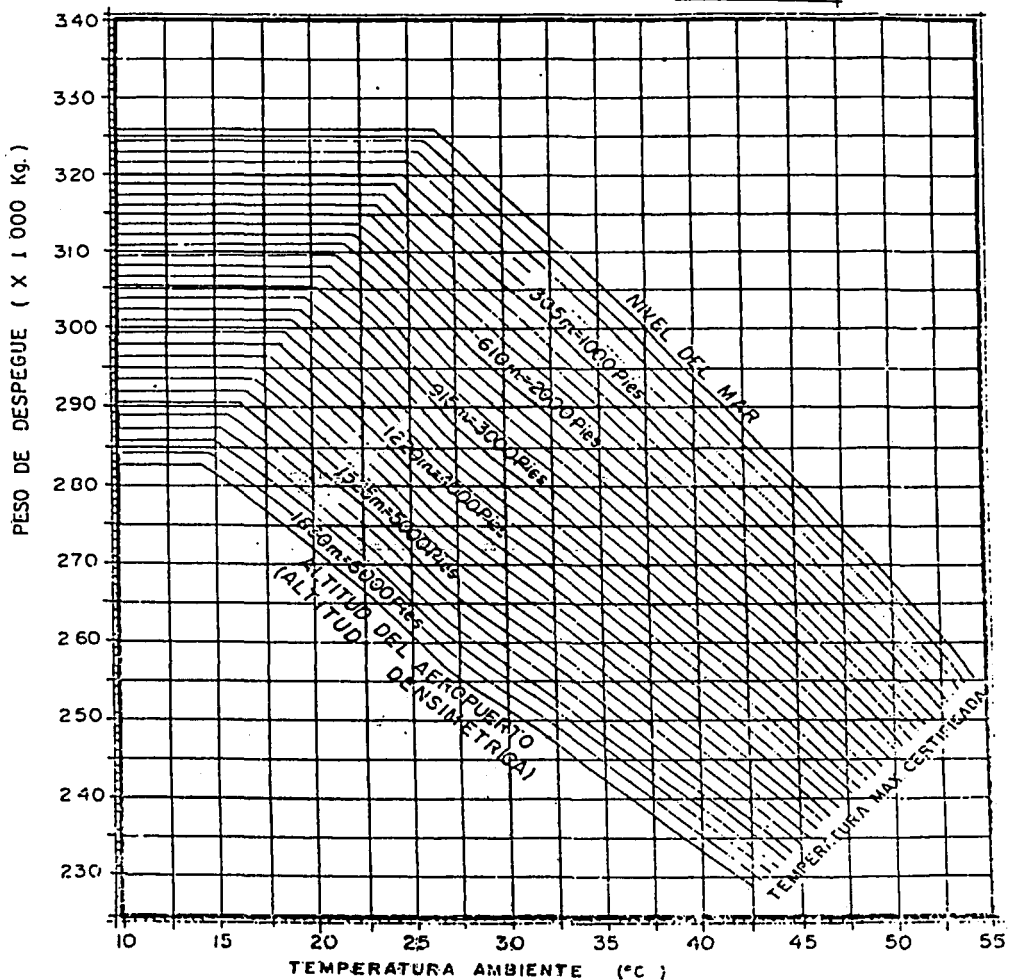
GRÁFICA DE PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS PARA COMBUSTIBLE HUMEDO Y ALETAS 10°.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

BOEING - 747
 MANUAL DE OPERACIONES

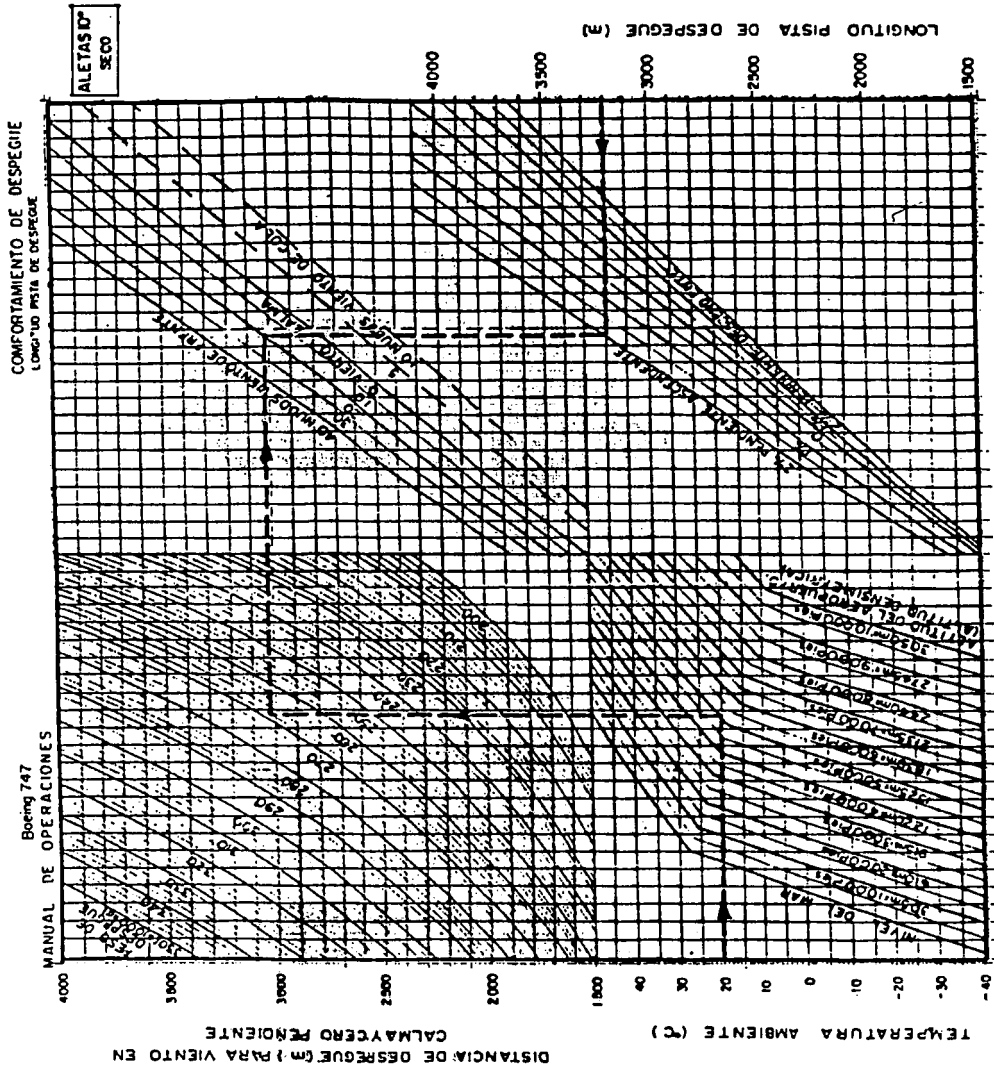
COMPORTAMIENTO DE DESPEGUE
 LIMITACION DE PESO POR ASCENSO.

HUMEDO
 ALETAS 20°



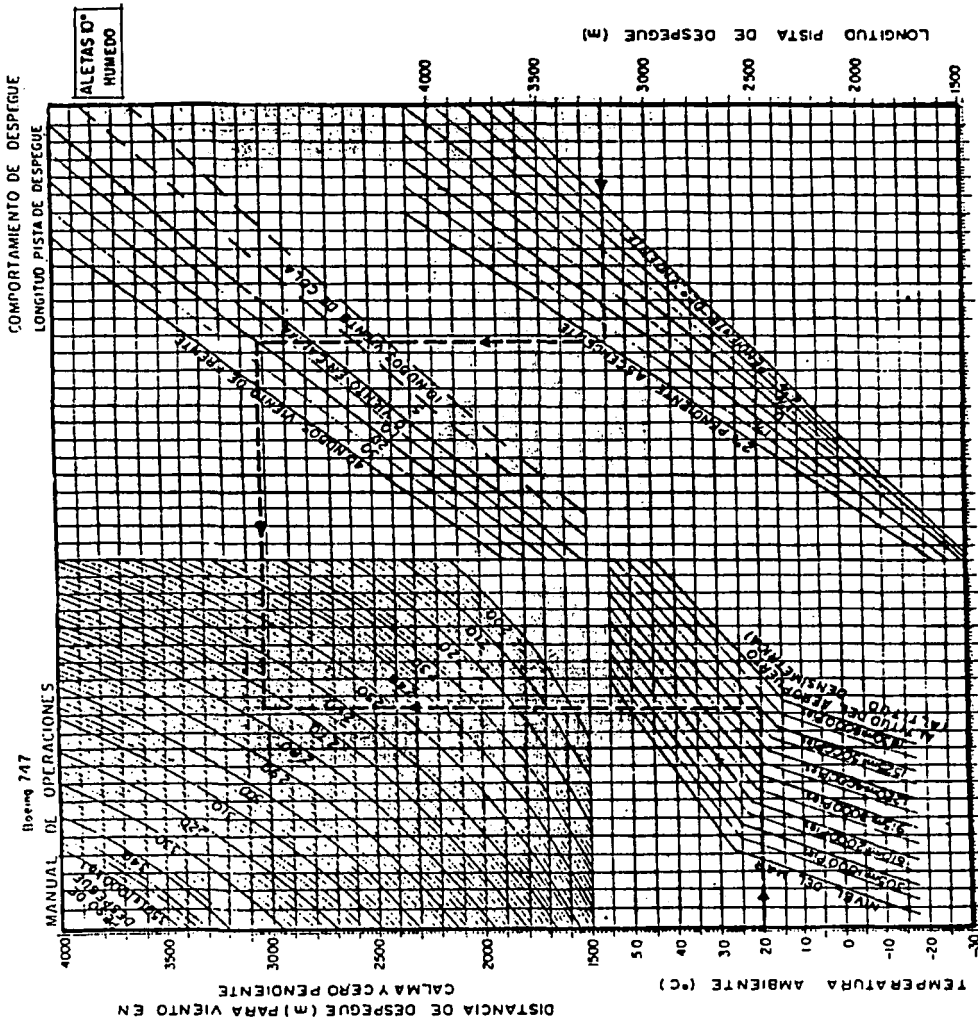
GRÁFICA DE PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS PARA COMBUSTIBLE HÚMEDO Y ALETAS 20°.

SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.



GRÁFICA DE LONGITUDES A PESOS MÁXIMOS DE DESPEGUE PARA COMBUSTIBLE SECO Y ALETAS 10°.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



GRÁFICA DE LONGITUDES A PESOS MÁXIMOS DE DESPEGUE PARA COMBUSTIBLE HÚMEDO Y ALETAS 10°.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DC-10
 DOC 1010
 DATE 7/15/71

FAA APPROVED
 DRAWING DIMENSIONS

MODEL DC-10
 SECOND SEGMENT LIFTING WEIGHT
 (CR-42 IMPACT)
 TARGET (2000)
 GEAR UP GROSS CHARGED = 37%
 SLATS EXTENDED
 ENGINE AIRSPEED FOR AIR CONDITIONING OFF
 MAXIMUM WEIGHT LIMITATIONS
 BY SECTION 1 PART 14.1000

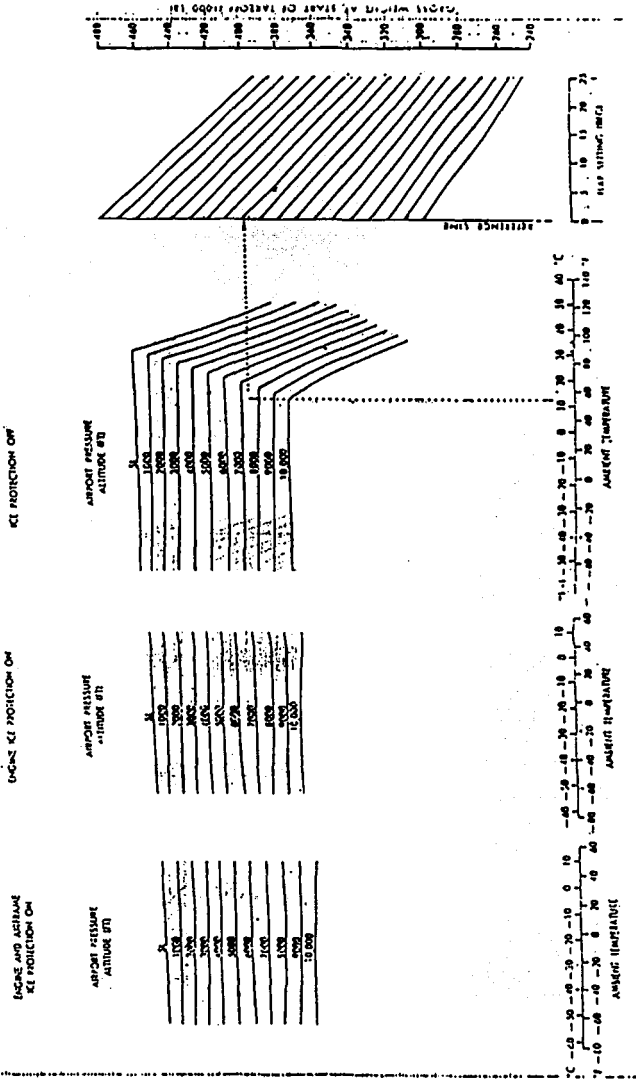


GRÁFICO DE MANUALES DE VUELO PARA UN DC-10.

V. ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS.

Para entender las especificaciones geométricas de las pistas es conveniente dividir las en 6 zonas específicas.

1. Pavimentos.
2. Márgenes laterales.
3. Franja de seguridad.
4. Áreas de seguridad de extremo de pista.
5. Zonas adicionales libres de obstáculos (en su caso). (CWY)
6. Zonas de parada (en su caso). (SWY)

En estas zonas ya predeterminadas de las pistas, es donde se presentan las diferentes especificaciones geométricas como la longitud, el ancho, las pendientes longitudinales y transversales, etc, tal y como se describe a continuación.

V.1 Pavimentos.

En cuanto al pavimento se refiere, el ancho de toda pista no deberá ser menor de la dimensión apropiada especificada en la siguiente tabla.

No. de clave.	Letra de clave.					
	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)
1	18	18	23	--	--	--
2	23	23	30	--	--	--
3	30	30	30	45	--	--
4	--	--	45	45	45	60

* El ancho de toda pista de aproximación de precisión no deberá ser menor de 30 m, cuando el número de clave sea 1 o 2.

ANCHO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE PISTAS.
Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

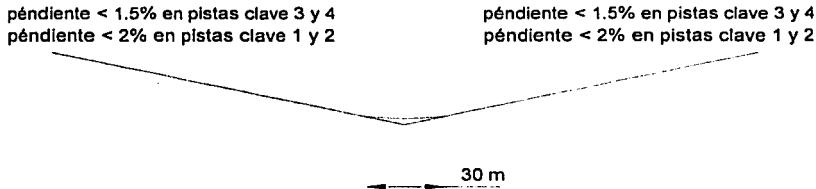
Otra de las especificaciones geométricas a mencionar es la pendiente efectiva longitudinal, la cual se obtiene al dividir la diferencia entre la elevación máxima y la mínima a lo largo del eje de la pista, por la longitud de ésta, donde dicho resultado no deberá exceder del 1% cuando la pista tenga clasificación 3 ó 4 (según la tabla anterior), y 2% cuando la clasificación sea 1 ó 2.

En ninguna parte de la pista la pendiente longitudinal deberá exceder del 1.25% cuando su número clave sea 4, excepto en el primero y último de los cuartos de la longitud de la pista, en los cuales la pendiente no deberá exceder el 0.8%; mientras que cuando sea una pista 3 no deberá exceder el 1.5%, excepto en el primero y último de los cuartos de la longitud de una pista para aproximaciones de

precisión de categoría II ó III, en los cuales la pendiente no deberá exceder del 0.8%. Por último la pendiente no deberá exceder el 2% cuando se trate de una pista 1 ó 2.

Cuando no se pueda evitar un cambio de pendiente entre dos consecutivas, llamado también cambios de pendiente longitudinal, éste no deberá exceder del 1.5% cuando la pista sea 3 ó 4; y del 2% cuando la pista sea 1 ó 2. Por otra parte la transición de una pendiente a otra deberá efectuarse por medio de una superficie curva con un grado de variación que no exceda el 0.1% por cada 30 m, (radio de 30,000m) cuando la pista sea 4; 0.2% por cada 30 m, (radio de 15,000 m) cuando la pista sea 3 y 0.4% por cada 30 m, (radio de 7,500m) cuando la pista sea 1 ó 2.

Grado de variación < 0.1% en pistas clave 4
Grado de variación < 0.2% en pistas clave 3
Grado de variación < 0.4% en pistas clave 1,2



CAMBIOS DE PENDIENTE PERMISIBLES EN PISTAS.

La Distancia Visible estará determinada cuando no se pueda evitar un cambio de pendiente, donde dicho cambio deberá ser tal que desde cualquier punto situado a 3 m por encima de una pista, sea visible otro punto situado también a 3 m por encima de la pista, dentro de una distancia igual, por lo menos a la mitad de la longitud de la pista cuando la letra clave sea C, D, E o F; de 2 m por encima de una pista que sea visible, otro punto situado también a 2 m por encima de la pista, dentro de una distancia igual, por lo menos, a la mitad de la longitud de pista, cuando la pista sea B y de 1.5 m por encima de una pista que sea visible, otro

punto situado también a 1.5 m por encima de la pista, dentro de una distancia igual, por lo menos, a la mitad de la longitud de pista, cuando la pista sea A.

Para poder determinar la distancia D entre cambios de pendiente a lo largo de una pista, deberán evitarse ondulaciones o cambios de pendiente apreciables que estén muy próximos. La distancia entre los puntos de intersección de dos curvas sucesivas no deberá ser menor que cualquiera de las siguientes:

- a. La suma de los valores numéricos absolutos de los cambios de pendiente correspondientes, multiplicados por el valor que corresponda entre los siguientes: 30,000 m cuando la pista sea 4, 15,000 m cuando la pista sea 3 y 5,000 m cuando la pista sea 1 ó 2,
- b. 45 m, tomando el que sea mayor.

Las pendientes transversales se utilizan para facilitar la rápida evacuación del agua de la superficie de la pista, en la medida de lo posible, deberá ser simétrica respecto al eje de la pista excepto en los casos en que una pendiente transversal única que descienda en la dirección del viento que acompaña a la lluvia con mayor frecuencia, asegure el rápido drenaje de la pista. La pendiente transversal óptima deberá ser de 1.5% cuando la pista sea C, D, E o F, y 2% cuando la pista sea A o B. Pero en todo caso, no deberá exceder del 1.5% ó 2%, según corresponda, ni ser menor al 1%, salvo en las intersecciones de pistas o de calles de rodaje en que se requieran pendientes más aplanadas. En pistas mojadas con viento transversal, cuando el drenaje sea defectuoso, es probable que se acentúe el fenómeno de hidrolaneo.

La pendiente transversal deberá ser básicamente la misma a lo largo de toda la pista, salvo en una intersección con otra pista o calle de rodaje, donde deberá proporcionarse una transición suave teniendo en cuenta la necesidad de que el drenaje sea el adecuado.

En el caso de que se proyecte una pista que combine los valores extremos para las pendientes longitudinales y cambios de pendiente, con pendientes transversales extremas, deberá hacerse un estudio, con el fin de asegurar que el perfil de la superficie resultante no dificulte las operaciones de los aviones. A estas pendientes se les llama *pendientes combinadas*.

La superficie de la pista deberá construirse sin irregularidades que den como resultado la pérdida en la eficacia del frenado, o afectar adversamente de cualquier otra forma el despegue y el aterrizaje de un avión. Las irregularidades de superficie pueden afectar severamente el despegue o el aterrizaje de un avión por causar rebotes, cabeceo o vibraciones excesivas, u otras dificultades en el manejo del avión. Se debe tener cuidado también al instalar luces empotradas a la pista puesto que son luces de baja altura y se ubican a cierta distancia del eje, a fin de evitar golpes que dañen a los trenes de aterrizaje.

Los movimientos de las aeronaves y las diferencias de asentamiento de los pavimentos con el tiempo tienden a aumentar las irregularidades de la superficie. Las pequeñas desviaciones respecto a las tolerancias anteriormente mencionadas, no deben afectar mayormente a los movimientos de las aeronaves, en general, son tolerables las irregularidades del orden de 2.5 a 3 cm en una distancia de 45 m. Por otro lado, no se puede dar información exacta sobre la irregularidad máxima aceptable, ya que ésta varía dependiendo del tipo de aeronave, y en ciertos casos, depende incluso de su masa, de la distribución de ésta, de las características del tren de aterrizaje y de su velocidad. Por lo que una irregularidad, como una secuencia de ondulaciones superficiales en la pista, considerada aisladamente como aceptable, podría inducir cargas dinámicas importantes en el tren de aterrizaje de la aeronave o vibraciones intensas, afectando la lectura de los instrumentos del puesto de pilotaje.

La deformación de la pista con el tiempo, puede también aumentar la posibilidad de formación de charcos, cuya profundidad solo sea de unos 3 mm, si están situados en lugares de la pista donde los aviones que aterrizan tienen gran velocidad. (pueden inducir el hidroplano)

La superficie de una pista pavimentada se construirá de modo que proporcione buenas características de rozamiento cuando ésta se encuentre mojada. El espesor de la textura superficial media, no deberá ser inferior a 1 mm, por lo que esto requiere, alguna forma especial de tratamiento de la superficie.

Cuando la superficie presente estrías o escarificaciones, éstas deberán ser perpendiculares al eje de la pista o paralelas a las uniones transversales no perpendiculares, aunque éstas siempre se presentan.

V.2 Márgenes laterales.

En todas las pistas de clave F y en las de tipo D o E con un ancho inferior a los 60 m, se deben proveer márgenes de pista. Estos márgenes deberán prepararse o construirse de manera que se reduzca al mínimo el peligro que pueda correr un avión que se salga de la pista o de la zona de parada.

El ancho de los márgenes laterales deberá extenderse simétricamente a ambos lados de la pista de forma que el ancho total de ésta y sus márgenes no sea inferior a 60 m para claves D o E y de 75 m para F.

Respecto a la pendiente transversal que se debe presentar en los márgenes, no deberá exceder el 2.5%, debido a que la superficie de la pista y los márgenes laterales se encuentran al mismo nivel.

V.3 Franja de seguridad.

La pista y cualquier zona asociada de parada están comprendidas dentro de una franja de seguridad.

La longitud de la franja deberá extenderse antes del umbral y más allá del extremo de la pista o de la zona de parada hasta una distancia de por lo menos 60 m cuando la pista sea 2, 3 ó 4; 60 m cuando la pista sea 1 IFR; y 30 m cuando la pista sea 1 VFR.

Para el ancho de toda franja que comprenda una pista para aproximaciones por instrumentos, se extenderá lateralmente hasta una distancia del eje de la pista y en su caso de su prolongación, de por lo menos:

- a. 150 m cuando la pista sea 3 ó 4.
- b. 75 m cuando la pista sea 1 ó 2.

Toda franja que comprenda una pista de tipo VFR, deberá extenderse a cada lado del eje de la pista y de su prolongación a lo largo de la franja, hasta una distancia mínima de:

- a. 75 m cuando la pista sea 3 ó 4.
- b. 40 m cuando la pista sea 2.
- c. 30 m cuando la pista sea 1.

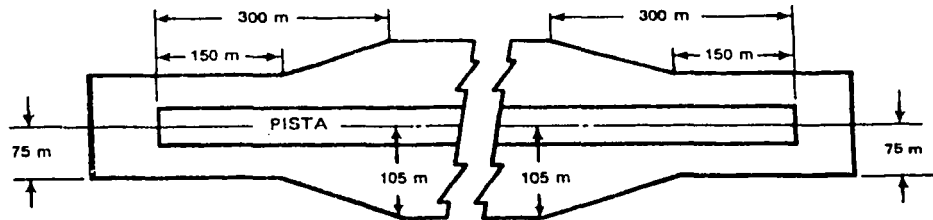
Con excepción del equipo o las instalaciones requeridas para fines de navegación aérea, todo objeto situado en la franja de seguridad de una pista y que pueda constituir un peligro para los aviones, deberá considerarse como un obstáculo y deberá eliminarse siempre que sea posible. Cualquier equipo o instalación requerido para fines de navegación aérea que deba estar emplazado en la franja de pista, deberá tener la menor masa y altura posible, ser de diseño y montaje frangibles, y situarse de tal modo que el peligro para las aeronaves se reduzca al mínimo.

Las características de nivelación de una franja de pista, se deben tomar en cuenta a partir de los siguientes factores.

La parte de una franja que comprenda una pista de vuelo por IFR, deberá proveer a partir del eje de la pista y su prolongación, un área nivelada en atención a los aviones a que está destinada la pista en el caso de que un avión se salga de ella, hasta una distancia mínima de:

- a. 75 m cuando la pista sea 3 ó 4.
- b. 40 m cuando la pista sea 1 ó 2.

En el caso de las pistas para aproximaciones de precisión sería conveniente adoptar un ancho mayor si la pista tiene una clasificación 3 ó 4. En la siguiente figura se indican la forma y dimensiones de una franja más ancha que podría considerarse para dichas pistas.



PARTE NIVELADA DE LA FRANJA DE UNA PISTA PARA APROXIMACIONES IFR CON
NÚMERO DE CLAVE 3 O 4.

Fuente. Manual de Proyecto de Aeropuertos. OACI.

Esta franja se ha proyectado utilizando los datos de las aeronaves que se salen de la pista, la parte que debe nivelarse, se extiende lateralmente hasta una distancia de 105 m desde el eje, pero esta distancia se reduce paulatinamente a 75 m en ambos extremos de la franja, a lo largo de una distancia de 150 m a partir del extremo de la pista.

La superficie de la parte de la franja colindante con la pista, margen o zona de parada estará al mismo nivel que la superficie de éstas. La parte de una franja situada por lo menos 30 m antes del umbral, deberá prepararse contra la erosión producida por el chorro de los motores, y proteger a los aviones que aterrizan de los peligros que ofrecen los bordes expuestos.

Por razones de mejorar el drenaje transversal, con frecuencia se recomienda que el borde sobre el margen lateral y la franja, tengan un escalón no mayor a 2.5 cm (1 in).

Las pendientes longitudinales a lo largo de la porción de una franja que ha de nivelarse, no deberán exceder de:

- 1.5% cuando la pista sea 4.
- 1.75% cuando la pista sea 3.
- 2% cuando la pista sea 1 ó 2.

Los cambios de pendiente longitudinal en la parte de una franja que deba nivelarse, deberán ser lo más graduales posible, debiendo evitar los cambios bruscos o las inversiones repentinas de pendiente.

Es conveniente que los cambios de pendiente se eviten o reduzcan al mínimo en el área anterior al umbral de una pista de aproximación de precisión en la parte de la franja situada dentro de una distancia de por lo menos 30 m a cada lado de la prolongación de la pista. Cuando la pista se utiliza por IFR y no pueden evitarse los cambios de pendiente, el régimen de cambio entre dos pendientes consecutivas no deberá exceder el 2% en 30 m.

Las pendientes transversales en la parte de una franja que haya de nivelarse deberán ser adecuadas para impedir la acumulación de agua en la superficie, pero no deberán exceder:

- a. 2.5% cuando la pista sea 3 ó 4.
- b. 3% cuando la pista sea 1 ó 2.

Las pendientes transversales en cualquier parte de una franja más allá de donde ha de nivelarse, no deberá exceder de una pendiente ascendente del 5%, medida en el sentido de alejamiento de la pista.

V.4 Áreas de seguridad de extremo de pista.

Un área de seguridad de extremo de pista deberá proveerse en cada extremo de una franja cuando:

- a. La pista sea 3 ó 4.
- b. La pista sea 1 ó 2 y además sea de aterrizaje por instrumentos.

El área de seguridad de extremo de pista deberá extenderse desde el extremo de una franja de pista hasta la mayor longitud posible, por lo menos hasta 90 m. Al decidir la longitud que debe proveerse, se debe proporcionar un área suficientemente larga como para dar cabida a los casos en que se sobrepasa el extremo de la pista y los aterrizajes demasiado largos que resulten de una combinación razonablemente probable, de factores operacionales adversos. En una pista para aproximaciones de precisión, el localizador del ILS es normalmente el primer obstáculo y las áreas de seguridad de extremo de pista deberán llegar hasta esa instalación. En otras circunstancias y en una pista para aproximaciones que no sean de precisión o de vuelo visual, el primer obstáculo puede ser una carretera, una vía férrea u otra característica artificial o natural. En tales circunstancias, las áreas de seguridad de extremo de pista deberán de extenderse tan lejos como el obstáculo. Para pistas 3 ó 4 se recomienda una longitud de 240 m y para pistas 1 y 2 una longitud de 120 m.

El ancho de un área de seguridad de extremo de pista deberá ser, por lo menos, del doble del ancho de la pista correspondiente.

Con excepción del equipo o las instalaciones requeridas para fines de navegación aérea, todo objeto situado en un área de seguridad de extremo de pista y que pueda constituir un peligro para los aviones, deberá considerarse como un obstáculo y deberá eliminarse siempre que sea posible. Cualquier equipo o instalación requerido para fines de navegación aérea que deba estar emplazado en el área de seguridad de extremo de pista, deberá tener la menor masa y altura posible, ser de diseño y montaje frangibles y situarse de tal modo que el peligro para las aeronaves se reduzca al mínimo.

Las pendientes combinadas de un área de seguridad de extremo de pista deberán ser tales que ninguna parte de dicha área penetre en las superficies de aproximación o de ascenso de despegue.

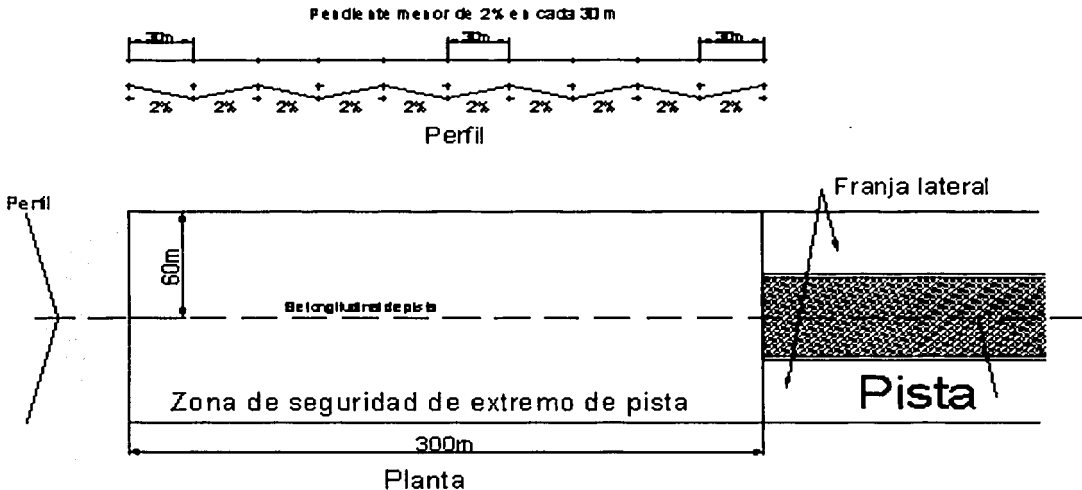
Las pendientes longitudinales de un área de seguridad de extremo de pista no deberán sobrepasar una inclinación descendente del 5%. Los cambios de pendiente longitudinal deberán ser lo más graduales posibles, debiendo evitar los cambios bruscos o las inversiones repentinas de pendiente.

Es conveniente que los cambios de pendiente se eviten o reduzcan a un mínimo en un área simétrica con respecto a la prolongación del eje de la pista de aproximadamente 60 m de ancho y 300 m de longitud antes del umbral de una pista de vuelos por instrumento. Cuando la pista se utiliza por IFR y no pueden evitarse los cambios de pendiente en la zona de enderezamiento de la aeronave sobre el terreno, el régimen de cambio entre dos pendientes consecutivas no deberá exceder al 2% en 30 m.

Las pendientes transversales de un área de seguridad de extremo de pista no deberá sobrepasar una inclinación ascendente o descendente del 5%. Las transiciones entre pendiente diferentes deberán ser lo más graduales posibles.

En la figura siguiente se pueden observar los cambios de pendientes en perfil y desde planta del área de seguridad.

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**



CAMBIOS DE PENDIENTE PERMISIBLES EN EL ÁREA DE SEGURIDAD DE PISTAS.

V.5 Zonas libres de obstáculos.

El origen de la zona adicional libre de obstáculos (CWY) se deberá encontrar en el extremo del recorrido de despegue disponible. La zona libre de obstáculos deberá extenderse lateralmente hasta una distancia de 75 m por lo menos a cada lado de la prolongación de la pista.

El terreno de una zona libre de obstáculos no deberá sobresalir de un plano inclinado con una pendiente ascendente del 1.25%, siendo el límite inferior de este plano una línea horizontal que:

- a. Sea perpendicular al plano vertical que contenga al eje de la pista.
- b. Pase por un punto situado en el eje de la pista al final del recorrido de despegue disponible.

En ciertos casos, cuando una pista, margen o franja presenten una pendiente transversal o longitudinal, el límite inferior de la zona libre de obstáculos, especificada anteriormente, podrá tener un nivel inferior al de pista, margen o franja. La recomendación no implica que dichas superficies deban tener un nivel igual a la altura del límite inferior del plano de la zona libre de obstáculos, ni que sea necesario eliminar del terreno los accidentes o los objetos que penetren por

encima de esta superficie más allá de la extremidad de la franja, pero por debajo del nivel de la misma, a menos que se consideren peligrosos para los aviones.

Se deben evitar los cambios bruscos de pendiente hacia arriba cuando la pendiente de una zona libre de obstáculos sea relativamente pequeña o cuando la pendiente media sea ascendente. Cuando existan estas condiciones, en la parte de la zona libre de obstáculos comprendida en la distancia de 22.5 m a cada lado de la prolongación del eje, las pendientes, los cambios de pendiente y la transición de la pista a la zona libre de obstáculos deberán ajustarse de manera general, a los de la pista con la cual este relacionada dicha zona, lo que no puede permitirse es la presencia de depresiones aisladas tales como zanjas que atraviesen la zona libre de obstáculos.

Con excepción del equipo o las instalaciones requeridas para fines de navegación aérea, todo *objeto* situado en una zona libre de obstáculos que pueda constituir un peligro para los aviones, deberá considerarse como un obstáculo y deberá eliminarse siempre que sea posible. Cualquier equipo o instalación requerido para fines de navegación aérea que deba estar emplazado en zona libre de obstáculos, deberá tener la menor masa y altura posible, ser de diseño y montaje frangibles y situarse de tal modo que el peligro para las aeronaves se reduzca al mínimo.

V.6 Zonas de parada.

Cuando se provea, la zona de parada (SWY), ésta tendrá el mismo ancho que la pista con la cual dicha zona este asociada.

Las pendientes y cambios de pendientes en las zonas de parada y la transición de un pista a una zona de parada, deberán cumplir las mismas especificaciones de pendientes que se establecen para las pistas, con las siguientes excepciones:

- a. No es necesario aplicar a la zona de parada las limitaciones de pendiente longitudinal del 0.8% en el primero y último cuarto de la longitud de la pista.
- b. En la unión de la zona de parada y la pista, así como a lo largo de la pista, el grado máximo de variación de pendiente puede ser 0.3% por cada 30 m (radio de 10,000) cuando la pista sea 3 ó 4.

La superficie de las zonas de parada pavimentadas se debe construir de modo que proporcione un buen coeficiente de rozamiento cuando la zona de parada esté mojada. La eficacia del frenado de las zonas de parada no pavimentadas no deberá ser considerablemente inferior a la de la pista con la que dicha zona de parada esta asociada.

VI. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD.

VI.1 Cálculo de la capacidad anual relacionada con la demora, según un método.

Como se mencionó en el tercer capítulo, en este método la determinación de la capacidad PANCAP implica encontrar el POH¹⁸, el POM¹⁹ y el ADO²⁰. Conociendo POH, POM y ADO, se puede llegar a conocer para cualquier nivel de tránsito asignado, los productos de POH × ADO y POM × ADO. El menor de los dos niveles de tránsito que corresponde a POH × ADO = 40 y POM × ADO = 80 es lo que se define como capacidad práctica anual (PANCAP).

Para poder determinar la capacidad práctica anual se tienen que seguir los siguientes pasos:

- a. Conociendo el tránsito mensual típico, se dividen los meses del año en tres grupos: tres meses punta, seis meses medios y tres meses bajos.
- b. Al conocer el tránsito diario durante estos meses, puede determinarse la media de tránsito durante cada día de la semana para cada mes en particular. Estas tres semanas (una para los meses punta, una para los meses medios y una para los meses bajos) son representativas del tránsito durante el año. Para cada semana, los días se agrupan en día punta, día medio y día bajo, por lo tanto se llegan a tener nueve días para caracterizar las fluctuaciones estacionales del tránsito diario durante el año.
- c. Una vez obtenidas las distribuciones horarias del tránsito, se establece una distribución horaria representativa del tránsito durante el día.
- d. Se presumen varios niveles de horas-punta de demanda y para cada nivel se determina la demanda anual de aeronaves.
- e. Para cada nivel de demanda horaria, se determina el número de horas sobrecargadas, que es el número de horas en un año en las que la demora media es mayor de cuatro minutos.
- f. Para cada nivel de demanda horaria, se determina el número de movimientos que existen en las horas sobrecargadas.
- g. De la información obtenida en los dos incisos anteriores, se obtiene la demora media de los aviones durante las horas sobrecargadas.

¹⁸ POH. Número de horas sobrecargadas que tienen lugar en un año.

¹⁹ POM. Número de operaciones que tienen lugar durante las horas de sobrecarga.

²⁰ ADO. Demora media de las aeronaves durante las horas de sobrecarga.

- h. Del inciso e, se determina el POH, del inciso f, se determina el POM y el ADO se obtiene del inciso g, siempre para cada uno de los niveles supuestos de demanda.

VI.2 Procedimiento simplificado para el cálculo de la capacidad anual.

La capacidad horaria ponderada de una configuración de un aeropuerto en particular, es la capacidad promedio a lo largo de un año y ponderada de acuerdo con los volúmenes de tránsito de cada pista particular, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

% de la capacidad máxima.	Factor de ponderación.
91 ó más.	1
81-90	2
66-80	4
51-65	8
40-50	12

CAPACIDAD PONDERADA DE LA PISTA.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

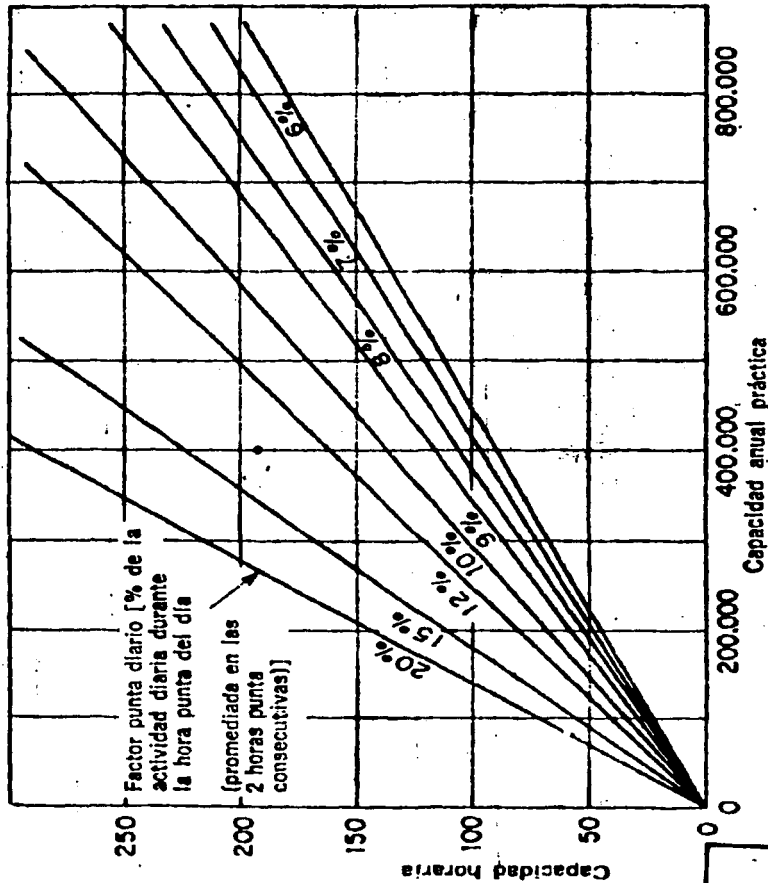
Como las demoras en las operaciones aumentan rápidamente con el incremento del flujo operacional, resulta necesario darle un factor mayor a las capacidades bajas al tratar la evaluación de la capacidad.

Suponiendo que la configuración de la pista consiste en dos pistas que se cortan, y que debido a los excesivos vientos de costado, el 30% de las veces sólo se puede utilizar una pista tanto para aterrizaje como para despegue.

Considerando que la capacidad de la pista única bajo condiciones VFR es de 54 movimientos y en condiciones IFR es de 35 movimientos, se tiene que cuando se utiliza esta configuración, las condiciones IFR se presentan el 30% de las veces, donde el otro 70% de las veces una de las pistas se utiliza para aterrizajes y la otra para despegue. La capacidad VFR de esta configuración es de 72 movimientos y la correspondiente en IFR es de 36 movimientos (las condiciones IFR se presentan el 4% de las veces en este último caso).

Entonces la capacidad máxima de este caso es de 72 movimientos y por tanto las cantidades de 35, 36 y 54 movimientos son, respectivamente el 49, 50 y 66% de la capacidad máxima.

Además de la capacidad horaria ponderada, es necesario determinar el *factor punta* que se define como el cociente del número de operaciones de las aeronaves durante la hora punta del día y el total de operaciones durante el día, expresado en porcentaje. Para el cálculo se utiliza la hora punta del día de más carga de la semana. Teniendo el número de operaciones totales del día, el número de operaciones durante las dos horas de punta consecutivas del día y el Factor Punta, se puede obtener la PANCAP de la siguiente gráfica.



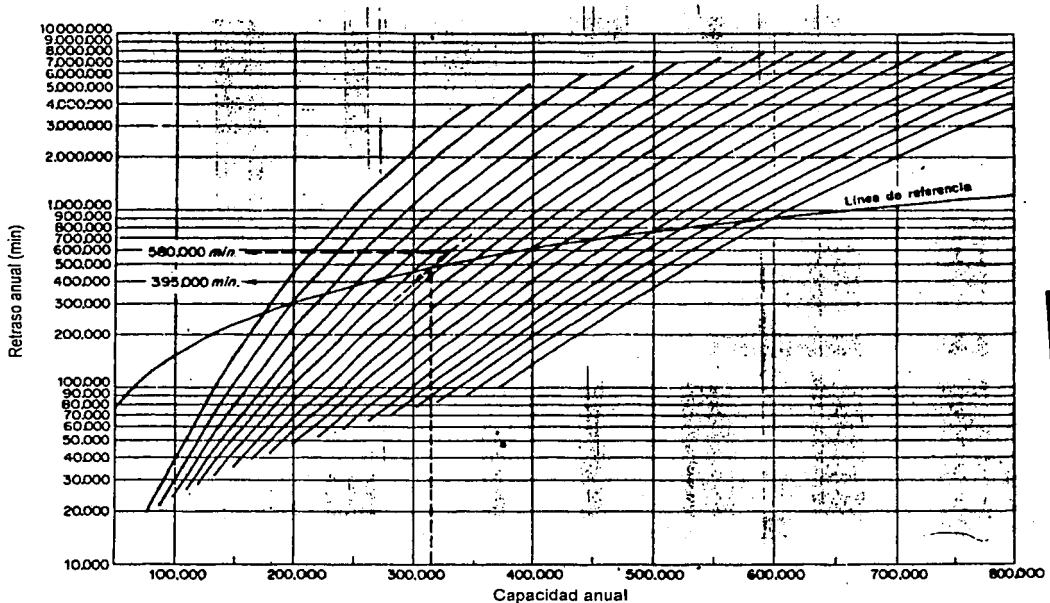
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

COMPARACIÓN DE LAS CAPACIDADES HORARIA Y ANUAL.
 Fuente: Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Por ejemplo, si existen 1,000 operaciones durante el día más cargado de la semana (365,000 operaciones al año) y un total de 160 operaciones en las dos horas punta consecutivas del día (80 operaciones por hora), la hora punta será de 8% del total diario, según la gráfica anterior.

VI.3 Demora anual.

Para determinar la relación entre la demora anual y la demanda anual, puede aplicarse el mismo procedimiento que se utilizó para determinar la capacidad anual; la única diferencia es que habría que registrar las demoras de todas las horas en las que existe tránsito, en vez de hacerlo solamente para las horas sobrecargadas. Para ello se requiere del conocimiento de la demanda horaria con relación a las demoras correspondientes para las distintas configuraciones de pistas. Utilizando este procedimiento, puede establecerse una relación entre la demanda y la demora anual como se puede observar en la figura:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DEMORA ANUAL CON RESPECTO A LA CAPACIDAD ANUAL.
Fuente: Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Entrando a la gráfica con la capacidad anual en el eje horizontal y siguiendo una vertical hasta el punto de intersección con la línea de referencia, se sigue la trayectoria de la curva de la demora anual correspondiente, tal y como se muestra

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**

dentro de la gráfica. Para poder hacer uso de esta figura, sin embargo, deberá conocerse la capacidad anual.

VI.4 Capacidades horaria y anual para diversas configuraciones de pistas.

En la siguiente tabla se puede observar un resumen de las capacidades horarias y anuales para algunas configuraciones típicas de pistas.

Configuración de pistas Descripción	Combinación	PANCAP	PHOCAP	
			IFR	VFR
Pista única (llegadas = salidas)	1	215,000	53	99
	2	195,000	52	76
	3	180,000	44	54
	4	170,000	42	45
Paralelas próximas (dependiente en IFR)	1	385,000	64	198
	2	330,000	63	452
	3	295,000	55	108
	4	280,000	54	90
Independiente en IFR Llegadas / salidas paralelas	1	425,000	79	198
	2	390,000	79	152
	3	355,000	79	108
	4	330,000	74	90
Independiente en IFR Llegadas y salidas	1	430,000	106	198
	2	390,000	104	152
	3	360,000	88	108
	4	340,000	84	90
Paralelas independientes Más o dos paralelas próximas	1	770,000	128	396
	2	660,000	126	304
	3	590,000	110	216
	4	560,000	108	180
Pistas en V suficientemente separadas con operaciones independientes	1	425,000	79	198
	2	340,000	79	136
	3	310,000	76	94
	4	310,000	74	84
Pistas en V abierta, dependientes de las operaciones hacia fuera de la intersección	1	420,000	71	198
	2	335,000	70	136
	3	300,000	63	94
	4	295,000	60	84
Pistas en V abierta, dependientes de las operaciones hacia la intersección	1	235,000	57	108
	2	220,000	56	86
	3	215,000	50	66
	4	200,000	50	53
Pistas que se cortan cerca del umbral	1	375,000	71	175
	2	310,000	70	125
	3	275,000	63	83
	4	255,000	60	69
Pistas que se cortan en el centro	1	220,000	61	99
	2	195,000	60	76
	3	195,000	53	58
	4	190,000	47	52

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Configuración de pistas Descripción	Combinación	PANCAP	PHOCAP	
			IFR	VFR
Pistas que se cortan lejos del umbral	1	220,000	55	99
	2	195,000	54	76
	3	180,000	46	54
	4	175,000	42	57

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

La combinación de clases de aviones se ha tipificado con los números 1, 2, 3 y 4 tal y como se indica en la siguiente tabla.

Combinación	Porcentaje.			
	A	B	C	D+E
1	0	0	10	90
2	0	30	30	40
3	20	40	20	20
4	60	20	20	0

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

VI.5 Determinación de la capacidad de pista que no está relacionada con la demora.

Estos tipos de modelos determinan el número máximo de operaciones de aeronaves que un sistema de pistas puede atender en un determinado intervalo de tiempo (usualmente una hora) cuando existe una demanda continua de servicio. En estos modelos, la capacidad es igual al inverso de la media ponderada del tiempo de servicio de todos los aviones a que sirve. Los modelos tratan la senda común de aproximación a la pista junto con la pista como sistema. El tiempo de servicio de pista, se define como el mayor de los tiempos entre la separación en el aire, en términos de tiempo, o el tiempo de ocupación de una pista.

Si todas las aeronaves pudieran espaciarse en el aire de una manera precisa, los intervalos de tiempo mínimos permisibles por las reglas de tránsito aéreo y si además llegaran al punto de entrada²¹ en el instante exacto que el controlador hubiese fijado para ello; se obtendrá un sistema libre de error, lo que resulta imposible conseguir en la práctica.

Los aviones no pueden lograr alcanzar el punto de entrada con tanta precisión, por consiguiente han de existir errores en la llegada a dicho punto (error de llegada al punto de entrada). También se producen errores entre el punto de entrada y el umbral de pista, principalmente debido a las velocidades de aproximación. Ambos

²¹ Punto de Entrada. Punto de la trayectoria de aproximación final a partir del cual, la trayectoria es común a todas las aeronaves que van a aterrizar en una pista determinada.

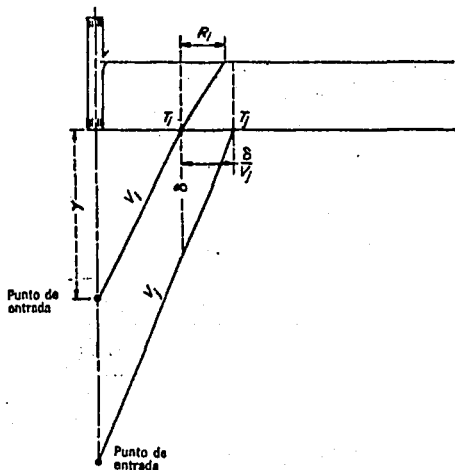
errores deberán ser sumados para obtener el error total desde el punto de entrada hasta el umbral de pista. El segundo error, entre el punto de entrada y el umbral, sin embargo, es normalmente mucho más pequeño que el primero.

En la formulación de los modelos, va implícito que el error de un avión no se ve influido por los demás aviones y que los errores son independientes unos de otros. A causa de los errores, los controladores incrementan el mínimo tiempo de separación entre aviones permitido por las reglas de tránsito aéreo en una cantidad que se conoce con el nombre de *tiempo de compensación*.

VI.6 Modelos para llegadas solamente.

Con muy poca pérdida de exactitud y para conseguir un cálculo más simple, las aeronaves se agrupan según sus diferentes velocidades (V_1, V_2, \dots, V_n). Para obtener el tiempo de servicio ponderado, en llegadas, es necesario calcular una matriz de intervalos mínimos de tiempo entre pares de aviones en el umbral de la pista. Con esta matriz y el porcentaje de las diferentes clases de aviones en el conjunto de ellos, puede calcularse el tiempo de servicio ponderado.

A continuación se presentan dos figuras en donde se puede observar la distancia mínima del umbral de la pista, con velocidades de aproximación.



donde

γ : longitud de trayectoria común de aproximación.

δ : distancia de separación mínima permisible entre aviones que se aproximan a lo largo de la trayectoria común de aproximación.

T_i : tiempo de llegada del avión i al umbral.

T_j : tiempo de llegada del avión j al umbral.

V_i : velocidad del avión precedente de clase i .

V_j : velocidad del avión subsecuente de clase j .

R_i : tiempo de ocupación de la pista del avión en cabeza con velocidad V_i .

DIAGRAMA DE ESPACIO TIEMPO PARA $V_i < V_j$.

Fuente. Robert Horonjeff, Diseño y Planificación de Aeropuertos

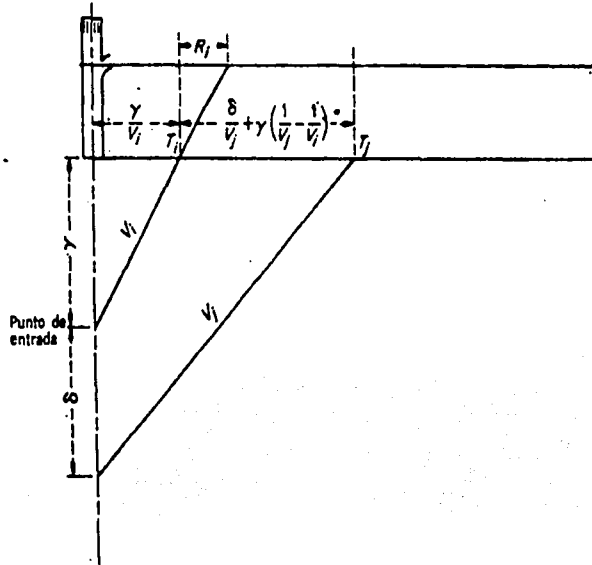


DIAGRAMA DE ESPACIO TIEMPO PARA $V_i > V_j$.
 Fuente: Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

- donde γ : longitud de trayectoria común de aproximación.
 δ : distancia de separación mínima permisible entre aviones que se aproximan a lo largo de la trayectoria común de aproximación.
 V_i : velocidad del avión precedente de clase i .
 V_j : velocidad del avión subsecuente de clase j .
 R_i : tiempo de ocupación de la pista del avión en cabeza con velocidad V_i .

Estos dos modelos representan la situación de un sistema perfecto sin errores. Para tener en cuenta los errores hay que sumar al intervalo mínimo de separación un tiempo de compensación. La magnitud de este tiempo de compensación depende de que la probabilidad de que estas violaciones sea aceptable.

VI.7 Modelos para tiempos de compensación en llegada y con error en el punto de entrada solamente.

Considerando ahora el caso de que $V_i > V_j$, el modelo se presenta bajo la suposición de que la aeronave de clase j deberá ser programada a no menos de δ km tras el avión de clase i cuando éste se encuentre en el punto de entrada; pero se supone que la separación estricta se refuerza gracias al control de tránsito

aéreo tan solo cuando la aeronave de clase j llega al punto de entrada. Esta hipótesis se puede observar en la siguiente figura:

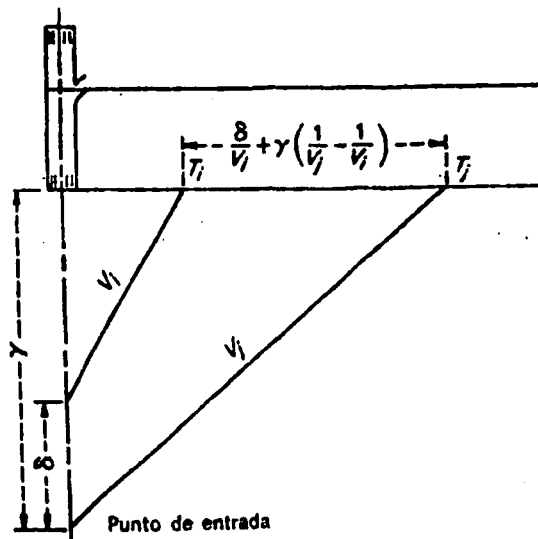


DIAGRAMA DE ESPACIO TIEMPO PARA $V_i > V_j$.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Para este caso, la probabilidad de violación es simplemente la probabilidad de que la aeronave de clase j llegue al punto de entrada antes que el avión de clase i esté a δ km.

VI.8 Modelo para operaciones mixtas.

Este modelo se basa en las mismas cuatro reglas operacionales del modelo realizado por el Airborne Instruments Laboratory, que son las siguientes:

- Las llegadas tienen prioridad sobre las salidas.
- Solamente puede ocupar la pista un único avión.
- No puede darse salida a un avión si la llegada inminente se encuentre a menos de δ_d km. del umbral de la pista (en condiciones IFR, este espacio depende de la velocidad de aproximación, de la altitud, de los procesos de control de tránsito aéreo y de la disponibilidad de calles de rodaje.)
- Las sucesivas salidas están espaciadas un mínimo de tiempo igual al tiempo t_d de servicio de salida.

En la siguiente figura se puede ver esquematizado el modelo para operaciones mixtas.

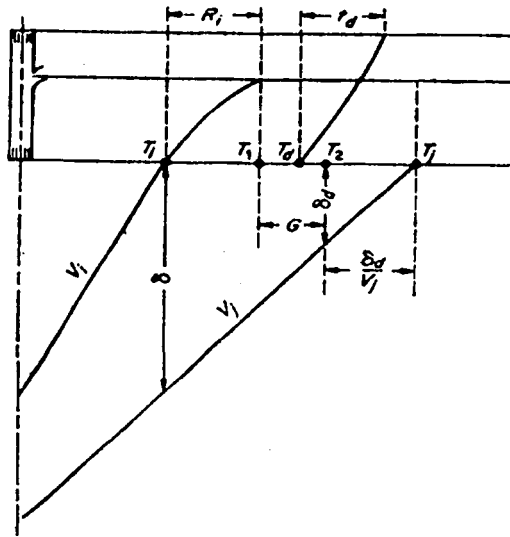


DIAGRAMA DE ESPACIO TIEMPO PARA OPERACIONES MIXTAS.
 Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

donde

- T_i : tiempo de llegada del avión i al umbral.
- T_j : tiempo de llegada del avión j al umbral.
- V_i : velocidad de aproximación del avión i .
- V_j : velocidad de aproximación del avión j .
- δ_d : distancia mínima desde el umbral a la que debe estar situada el avión j que llega para poder dar salida a otro.
- δ : separación mínima entre dos llegadas i y j .
- G : intervalo de tiempo durante el que puede darse salida a un avión satisfaciendo la regla c , anterior.
- T_d : instante en que un avión comience su despegue.
- T_1 : momento en que el avión i , abandona la pista .
- T_2 : momento máximo hasta el que el despegue puede ser retrasado.
- t_d : tiempo de servicio para despegue.
- R_i : tiempo de ocupación de la pista por el avión i .

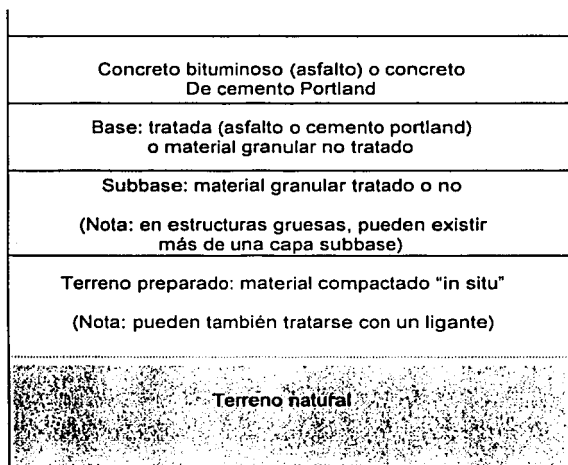
VI.9 Volumen anual de operaciones.

Paralelamente a la capacidad anual de un aeropuerto, se debe considerar también una medida de capacidad que resulta más fácil de comprender y mucho más fácil de calcular. Esta medida es el *Volumen Anual de Operaciones*, que se define como: *límite superior de operaciones anuales que un aeropuerto espera poder llevar a cabo.*

Es decir, se debe tomar en cuenta la capacidad horaria, el número de horas de actividad al día y el número de días en el año (365 días). Donde el número de horas de actividad en el día se refiere a las horas consecutivas en las que se lleva a cabo el 90% de las operaciones diarias siendo que este número depende de los itinerarios, pero en promedio no excede de las 16 horas.

El volumen anual de servicios será regularmente un poco mayor que la capacidad anual, ya que por definición, es un límite superior de operaciones que no está relacionada con un nivel específico de demora.

El pavimento tiene por objeto proporcionar una superficie de rodamiento uniforme y segura en todo tiempo, siendo el espesor de cada capa el adecuado para asegurar que las cargas que inciden sobre el pavimento no deterioren la capa superficial ni las subyacentes. En la figura siguiente, se muestra la sección tipo de un pavimento para aeropuertos, para el caso de grandes cargas.



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

SECCIÓN ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Existen unas zonas llamadas *áreas críticas* las cuales requieren pavimento más grueso, como son los extremos de pistas, las calles de rodaje de entrada y las plataformas. Estas áreas están sujetas a las más diversas cargas por parte de los aviones. El espesor del pavimento en áreas no críticas puede reducirse respecto al espesor del mismo en las áreas que sí lo son.

Debido a que existen varios métodos para proyectar los pavimentos de un aeropuerto, para pavimentos flexibles existe uno que se utiliza con bastante generalidad, el cual está basado en el ensayo de proporción de deformación del material o valor relativo de soporte (CBR). Similarmente, para la elección del espesor de una losa en los pavimentos rígidos, se utilizan ampliamente métodos basados en las soluciones originales de Westergaard.

VII.1.1 Pavimentos flexibles.

Un pavimento flexible puede constar de una o más capas de material que reciben los nombres de *capa de rodadura o superficie de rodamiento*, *base* y *sub-base*, que descansan sobre otra capa que recibe el nombre de *terreno mejorado*. Sobre ésta última capa de material, es sobre la que se apoyan las demás.

La capa de rodadura está formada por una mezcla de material bituminoso (generalmente cemento asfáltico) y árido, alcanzando espesores desde un mínimo de 7.5 cm hasta 30 cm como máximo, aunque en ciertas ocasiones el espesor es mayor. Sus principales funciones son: proporcionar suavidad y seguridad en las operaciones de tránsito, resistir los efectos de las cargas aplicadas y de influencias ambientales en determinados periodos de actuación así como se encargan de distribuir las cargas en las capas subyacentes.

La capa base puede estar formada por material granular tratado o no, al igual que la capa de rodadura, la base debe resistir los efectos de las cargas y de las condiciones ambientales y distribuir dichas cargas sobre las capas subyacentes así como impedir el flujo de agua hacia capas inferiores.

La función de la sub-base es casi la misma que la de la capa base aunque de calidad menor, solo que no todos los pavimentos flexibles podrían requerir de una capa sub-base, aunque los pavimentos de gran espesor pueden estar compuestos por varias de estas capas.

La subrasante es el cimiento del pavimento, su capacidad de soporte rige el espesor necesario de los pavimentos flexibles y rígidos. La profundidad de penetración de la congelación y la influencia de las condiciones de drenaje, pueden afectar el valor de soporte de la subrasante. Por medio de la nivelación selectiva, puede ser económico reemplazar el material de inferior calidad de la subrasante con mejor material que el de la capa superior, así como reducir los requisitos de espesor de la sub-base. La subrasante debe compactarse escrupulosamente, para proporcionar la más alta capacidad de soporte posible.

Para pavimentos flexibles, las capas superficiales bituminosas utilizadas en los aeropuertos, deberán ser de espesor suficiente para asegurar que no se transmitan esfuerzos excesivos a la capa subyacente y que las tensiones en la misma capa, no lleguen a producir fisuras prematuras.

La capa base que se encuentra inmediatamente debajo de la capa bituminosa de rodadura, deberá ser capaz de soportar tensiones producidas en la zona que se encuentra debajo de las ruedas de un avión. La estabilidad necesaria depende del tipo y espesor de la capa de rodadura y de la magnitud de la carga, por lo que el espesor mínimo recomendado para esta capa no debe ser menor de 15 cm.

La FAA ha desarrollado una relación entre las clases de suelo y el espesor de la capa superficial, la capa base y la sub-base necesarias para diferentes pesos brutos de avión, basados en diferentes condiciones de drenaje y en la acción de la congelación.

El buen drenaje implica que el agua de la superficie se elimine rápidamente, que el nivel del agua freática se baje y que no exista acumulación de agua en el suelo ya

sea por filtración o por capilaridad. El mal drenaje indica una condición en la que la subrasante puede volverse inestable debido a la saturación.

La clasificación de congelación se aplica cuando la profundidad de penetración de la congelación para un sitio en particular, es mayor que el espesor total provisto de pavimento para condiciones de no congelación y drenaje apropiado.

Para poder llevar a cabo el diseño de pavimentos se necesita determinar primero el peso del avión y las características del tren de aterrizaje del avión crítico que se espera y el número de despegues convertidos de toda la flota estimados al final de la vida útil. (20 años) Con estos datos y las gráficas de diseño adecuadas se puede obtener el espesor total del pavimento, espesor de la base y sub-base.

Los requisitos de la capa superficial o carpeta son para proteger la base, del agua de la superficie, y proporcionar una superficie suave para las operaciones de los aviones. La FAA recomienda un concreto asfáltico de grano denso, tendido en caliente y producido en una planta mezcladora central para la capa de trabajo de pavimentos flexibles.

Los materiales para la base incluyen una amplia variedad para obtener la máxima ventaja de los materiales locales y de las prácticas de construcción. Cuando se usan agregados de alta calidad, los tratamientos de asfalto o cemento producen bases que son más eficaces que las bases no tratadas.

La sub-base parte integrante de la estructura del pavimento flexible, está protegida por la carpeta y la base, en consecuencia, las exigencias del material no son tan estrictas como lo son para la base.

VII.1.2 Pavimentos rígidos.

El pavimento rígido está formado por una losa de concreto de cemento Portland con un espesor que varía de 20 a 60 cm y que va colocada sobre un lecho de material de préstamo. Para pavimentos de tránsito pesado, en especial resulta conveniente el que de los 10 cm superiores de este préstamo se le añada cemento o asfalto, con objeto de disminuir al máximo el bombeo. Cuando los suelos de terrenos de grano fino están saturados, el bombeo solo se genera si hay exceso de agua en la sub-base, y las juntas no están debidamente selladas a través de las cuales se filtra el agua pluvial. Lo suelos más propensos al bombeo son aquellos en los que predominan las partículas de limo y arcilla.

A esta capa que se encuentra bajo la losa podría considerársele como una sub-base, ya que no tiene porque tener la calidad que tendría el material situado inmediatamente por debajo de una delgada capa bituminosa.

Los recientes ensayos llevados a cabo, indican la ventaja que ofrecen las bases estabilizadas (con asfalto o con cemento), ya que mejoran la función de los pavimentos sujetos a frecuentes repeticiones de cargas pesadas.

En los estudios de campo realizados, se ha demostrado también que la compactación producida en una determinada capa por el tránsito, es función de la carga total, disposición de las ruedas, presión de las mismas, número de repeticiones y del espesor de dicha capa.

Para pavimentos rígidos, se tiene que las tensiones se originan por diferentes conceptos:

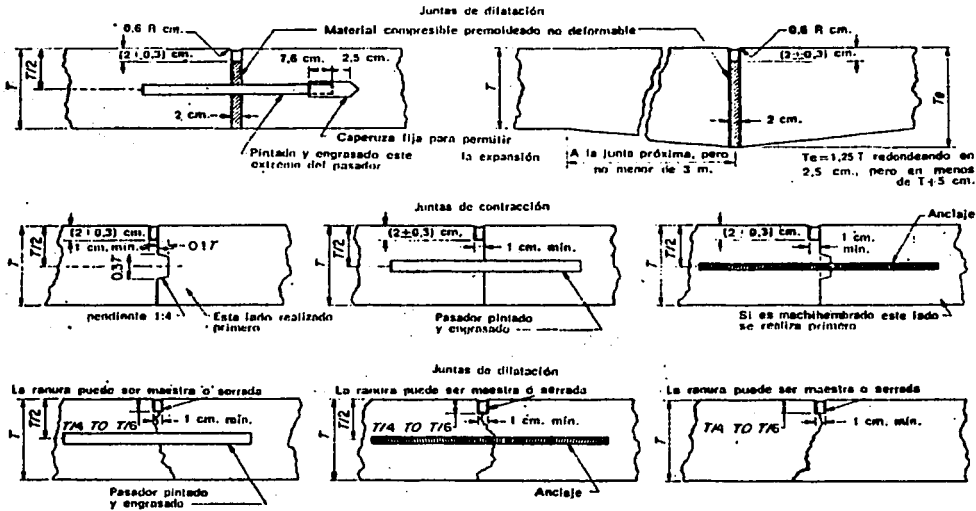
- a. Cargas debidas a las ruedas.
- b. Deformación de la losa debida a las diferencias de temperatura entre la superficie y la parte inferior de la misma.
- c. Deformación de la losa debido a variaciones de humedad entre la superficie y la parte inferior de la losa.
- d. Rozamiento entre la losa y el cimiento en los cambios de volumen de la losa.

La primera consideración a tener en cuenta a la hora de proyectar cualquier pavimento es la carga que va a soportar. Cuando se conoce esta carga, el siguiente paso consiste en determinar las tensiones críticas que se originan en la losa. Con estos datos, se pueden utilizar las gráficas de diseño para determinar los espesores totales de la carpeta, base, sub-base y subrasante del pavimento.

Para las áreas no críticas, en orilla de pista, el espesor de la losa se puede reducir en un 30%, pero no se reduce el espesor de la sub-base. En calles de rodaje de salida, el espesor de la losa se reduce en un 10%. El espesor de la sub-base debe aumentarse, si se requiere, cuando el espesor indicado del pavimento y sub-base no sea adecuado para evitar el efecto de congelación. En regiones áridas la sub-base puede disminuirse en ciertas circunstancias.

Las juntas y los refuerzos utilizados en el concreto de aeropuertos son similares a los usados en las autopistas, excepto que se utilizan losas más gruesas y espigas más largas. Las juntas longitudinales del tipo machihembradas, se espacian hasta cada 3.75 m (12.5 ft) de centro a centro para losas de menos de 25.4 cm (10 in) de grueso y hasta 7.5 m (25 ft) para losas más gruesas. Las juntas de dilatación longitudinal son aconsejables en las uniones de pistas de rodajes y junto a las estructuras. Las de contracción transversal o juntas contra el alabeo, están separadas de 4.5 a 7.5 m (15 a 25 ft) en pavimentos no reforzados y de 13.5 a 22.5 m (45 a 75 ft) cuando se usa refuerzo distribuido. En general, las juntas de dilatación transversal no se usan, excepto en las intersecciones. Para el refuerzo de los pavimentos se usan espigas a través de las juntas de dilatación así como a través de las juntas de contracción en algunos de los diseños para pavimentos rígidos, las varillas de amarre o refuerzo por adherencia se llevan a través de uniones articuladas, es decir, contra el alabeo.

En la siguiente figura se muestran algunas de las juntas utilizadas para pavimentos rígidos.



JUNTAS EN LOSAS DE CONCRETO.

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

VII.2 Drenaje de aeropuertos.

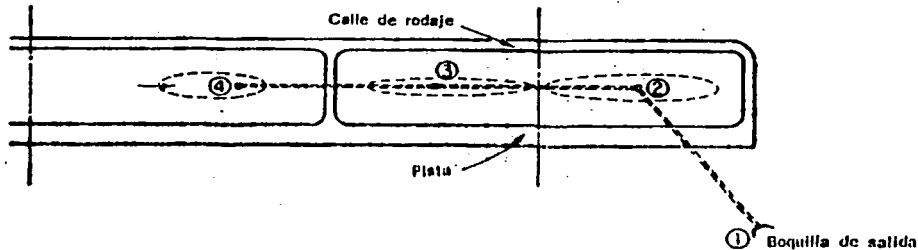
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La existencia de un adecuado drenaje para la evacuación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, resulta vital para la seguridad del avión y duración de los pavimentos. Un drenaje inadecuado implica la formación de charcos en la superficie del pavimento, que pueden resultar peligrosos para el despegue y aterrizaje de los aviones. Un mal drenaje también puede implicar un deterioro rápido de los pavimentos. Las pendientes suaves, tanto en sentido longitudinal como en el transversal y las amplias superficies pavimentadas presentan, frecuentemente, dificultades para conseguir el adecuado drenaje en las pistas de los aeropuertos.

Las funciones del sistema de drenaje de un aeropuerto son las siguientes:

- Intercepción y desviación de las corrientes de agua superficiales y subterráneas que se originan en los terrenos adyacentes.
- Evacuación del agua superficial.
- Evacuación de las aguas subterráneas, si se presentan.

En muy pocos casos será suficiente el drenaje natural para cumplir estas funciones; consecuentemente, debe disponerse de un sistema de drenaje artificial. En la siguiente figura se muestra una parte del sistema de drenaje de un aeropuerto.



DRENAJE DE UN AEROPUERTO.

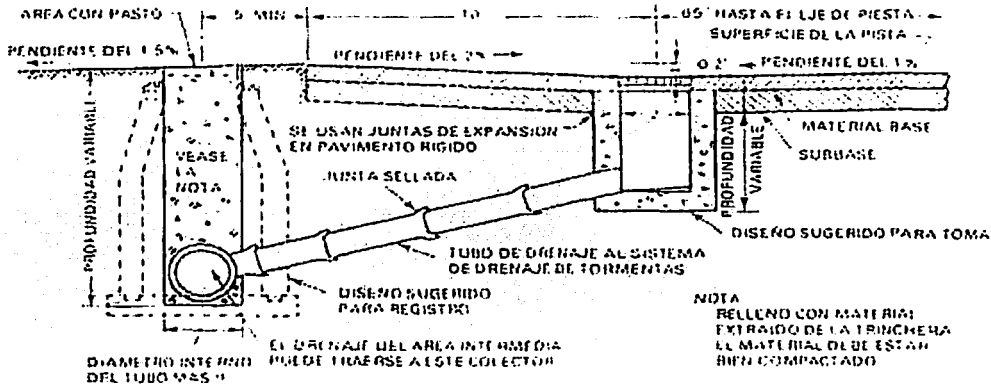
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

La intensidad de las precipitaciones a las que debe acomodarse el sistema de drenaje implica consideraciones económicas. Puede ocurrir que se presente una precipitación de gran magnitud y poco frecuente, que indudablemente causará daños si el sistema de drenaje está proyectado para precipitaciones de menor escala, sin embargo, si no se prevén interrupciones graves en el tránsito, no tendrá justificación económica un sistema de drenaje que recoja las mayores precipitaciones. Teniendo en cuenta estos factores, la FAA recomienda que en los aeropuertos, se proyecte el sistema de drenaje para una precipitación cuya probabilidad de presentarse sea una vez cada cinco años, sin embargo, el proyecto deberá comprobarse con una precipitación de menor frecuencia (diez y quince años), con objeto de averiguar si como resultado de tal precipitación se derivan grandes daños o interrupciones en el tránsito de las aeronaves.

La determinación de la cantidad de agua a evacuar que pueda esperarse en el lugar de emplazamiento del aeropuerto, es el primer paso a seguir para proyectar un sistema de drenaje. La intensidad de las precipitaciones se expresa en milímetros de altura por hora para las diferentes duraciones de alguna en particular. Otro factor importante es la frecuencia prevista para dicha precipitación, puesto que la intensidad va relacionada con la frecuencia de las precipitaciones. El funcionamiento del sistema de drenaje de un aeropuerto, se lleva a cabo, por medio de una nivelación apropiada donde la superficie se drena hacia los colectores. El escurrimiento usualmente se colecta, a lo largo de los bordes de las franjas de aterrizaje, con zanjas poco profundas que llevan a los tubos de toma de las alcantarillas pluviales, tal y como se muestra en la figura.

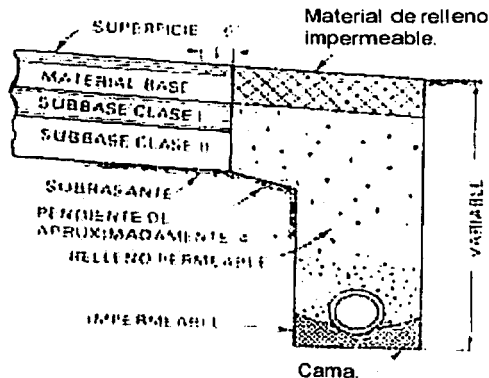
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.



TOMA DEL DRENAJE EN EL BORDE EXTERIOR DE LA PISTA.
Fuente. Manual del Ingeniero Civil. Vol. III.

El drenaje bajo la superficie, se obtiene haciendo uso de drenes interceptores y una capa base permeable en forma muy semejante a como se drenan las autopistas. Algunos campos más chicos con pasto se drenan por medio de una red de subdrenes que cubren el área entera. En los aeropuertos con pistas pavimentadas, los subdrenes están colocados normalmente a los lados de los bordes de pista, en donde las condiciones del suelo indiquen que es necesario el drenaje para hacer descender el nivel del agua del terreno. Regularmente se utiliza una combinación de interceptor y dren base como los mostrados en la siguiente figura.



INTERCEPTOR Y DREN DE LA BASE.
Fuente. Manual del Ingeniero Civil. Vol. III.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El drenaje de la superficie se logra colectando el agua de la misma en las tomas. Es necesario un sistema de tubos subterráneos para llevar el escurrimiento desde las tomas y subdrenes a las salidas en las vías acuáticas. En áreas bajas, las aguas superficiales se drenan en ocasiones hacia zanjas o canales que corren alrededor del perímetro del aeropuerto.

Para diseñar el sistema de drenajes se necesita un plano topográfico con curvas de nivel, sobre el cual se indica el diseño propuesto de pistas, calles de rodaje, plataformas y el edificio de pasajeros. Se indica la localización de tomas, subdrenes y tuberías de drenaje del agua pluvial, diseñadas para colectar la descarga. El sistema debe ser tan directo como sea posible, para evitar las longitudes excesivas de tuberías y los cambios frecuentes en los tamaños de los tubos. El proyecto debe considerar los perfiles de las estructuras con los niveles a centímetros.

VII.3 Radioayudas

La principal radioayuda que se emplea para aterrizar se conoce como ILS, que es un medio electrónico que proporciona información tridimensional en la parte final de la aproximación de un aeropuerto, para permitir que un avión aterrice con seguridad aún con tiempo inclemente. Este sistema consta de un localizador, de trayectoria de planeo, marcador exterior y marcador medio.

Otros controles de tránsito aeroportuario son la vigilancia por medio de radar, el cual controla el tránsito dentro de una distancia considerable a partir del aeropuerto.

El sistema de radar para aproximación de precisión se utiliza para monitorear el tránsito que se aproxima a la pista instrumental, éste se localiza a lo largo de la pista instrumental de 400 a 750 pies del eje de la pista. Este sistema es poco usado en aeropuertos civiles.

El equipo VOR²² es un dispositivo similar al de navegación terminal en ruta. Cuando se coloca en un aeropuerto debe haber una zona despejada de 360 m (1200 ft) en todas direcciones, para asegurar que se indica el curso azimutal verdadero.

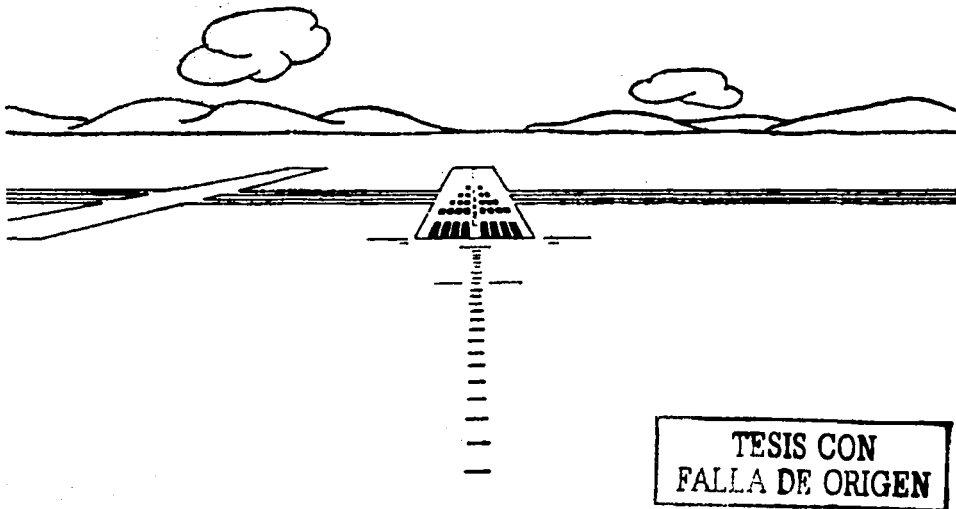
El transmisómetro es un dispositivo que proporciona información sobre mediciones de visibilidad para el área de toma de contacto de la pista. Este dispositivo se localiza a un poco más de 120 m (400 ft) del eje de la pista.

²² Capitulo III, página 29.

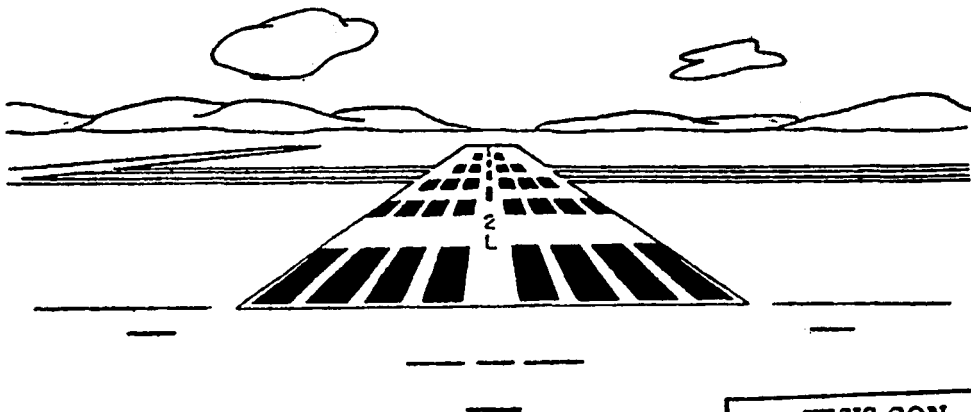
Las torres de control de tránsito aéreo deben localizarse en un punto desde el cual sean visibles todas las pistas, calles de rodajes y plataformas. Los requisitos para las torres de control son variables dependiendo del aeropuerto.

VII.4 Ayudas Visuales.

Los pilotos necesitan de ayudas visuales tanto con buen tiempo como con malo y a la luz del día o por la noche. Durante el día, debido a la luz solar, no suele necesitarse luz artificial, lo que si es necesario, es disponer de un cierto contraste dentro del campo de visión y de suficiente luminosidad, de tal manera, que los obstáculos más representativos del aeropuerto puedan ser identificados desde el aire, a fin de que el piloto conozca su posición en el espacio con respecto a los mismos. Estas condiciones se cumplen a la luz del día cuando éste es claro, la pista, para los aviones convencionales, aparece como una larga y estrecha banda, con bordes rectos y libres de obstáculos, por tanto, puede fácilmente identificarse a distancia o cuando se vuela sobre el campo. Los pilotos utilizan la perspectiva de la pista y otras señales de referencia como ayudas visuales para orientarse cuando se acercan al aeropuerto para aterrizar. La experiencia ha demostrado que los elementos más importantes que un piloto debe ver son: el horizonte, los bordes de pista, el umbral y el eje, los cuales se muestran de manera esquemática en las siguientes figuras.



APROXIMACIÓN DURANTE EL DÍA A 60 M DE ALTURA Y 1,000 M DEL UMBRAL.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

APROXIMACIÓN DURANTE EL DÍA A 24 M DE ALTURA Y 240 M DEL UMBRAL.

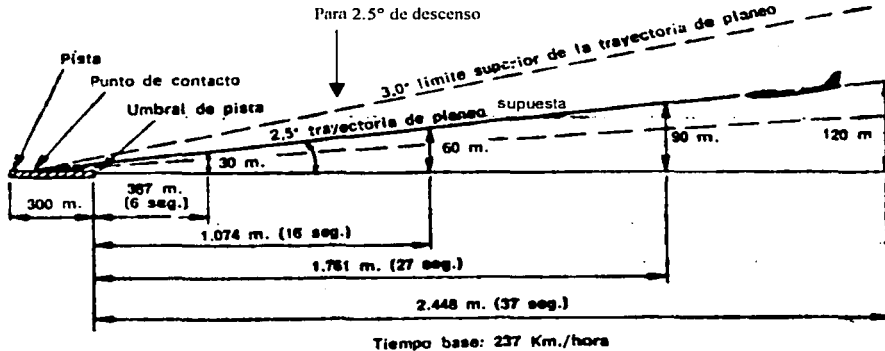
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Durante el día con baja visibilidad y por la noche, la información visual se reduce considerablemente en comparación con la situación durante el día con atmósfera clara, es por esto, que es esencial disponer de ayudas visuales, que sean lo más significativas posibles para el piloto.

El aterrizaje de un avión puede imaginarse como una secuencia de operaciones realizadas por un cuerpo móvil en una cuadrícula tridimensional y que se aproxima a una cuadrícula bidimensional fija. Mientras está en el aire, el avión puede considerarse como una masa puntual referido a un sistema coordenado ortogonal tridimensional, en el que puede trasladarse según tres direcciones coordenadas y girar alrededor de los mismos. Si estos tres ejes son el horizontal, el vertical y el tercero longitudinal, las direcciones de los movimientos pueden considerarse como lateral, vertical y longitudinal. Las rotaciones reciben el nombre de cabeceo, balanceo y guiñada, según los ejes horizontal, vertical y longitudinal a la pista respectivamente.

Durante un aterrizaje, los pilotos deben controlar y coordinar los seis grados de libertad del avión (tres de desplazamiento y tres de giros), de tal manera, que lo lleven según la trayectoria determinada, a tomar contacto con el suelo en un punto de la pista. Para conseguirlo, necesitan información sobre el avance, de acuerdo con la alineación de la aeronave (altura y distancia), información sobre los giros según el cabeceo, balanceo y guiñada, así como información sobre la velocidad de descenso y de acercamiento a la trayectoria deseada. En la siguiente figura,

pueden verse las relaciones existentes entre la trayectoria de planeo, altura y distancia durante un aterrizaje normal.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RELACIONES ENTRE LA TRAYECTORIA DE PLANEADO, ALTURA, TIEMPO Y DISTANCIA.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

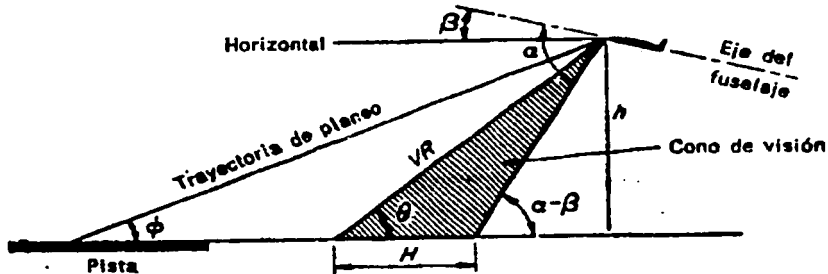
Para la guía de alineación, el piloto debe conocer su desviación lateral con respecto al eje de la pista. La mayoría de las pistas tienen de 22.5 a 60 m de ancho y de 900 a 4,000 m de longitud, es por ello por lo que cualquier pista aparece como una larga y estrecha cinta cuando se ve por primera vez a varios miles de metros de distancia. Las guías de referencia predominantes son las que constituyen el eje y los bordes. Todas las ayudas, tales como la pintura, la iluminación o el tratamiento superficial, que producen contraste y realzan estos elementos lineales, resultan de ayuda al suministrar información sobre la alineación.

En cuanto a la información altimétrica se refiere, la estimación de la altura sobre el terreno según observación visual, es uno de los juicios más difíciles para el piloto, no resulta factible obtener una buena información sobre la altura disponiendo de un sistema de luces de aproximación, por ello, la mejor fuente es la que ofrecen los instrumentos de la aeronave, sin embargo, el uso de estos instrumentos requiere el disponer en tierra de un sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS), aunque hasta cierta altura se complementan con otros equipos como lo son el radio altímetro.

Existen una serie de parámetros que influyen sobre lo que el piloto puede ver del terreno. Uno de ellos es el ángulo de visión del puesto de pilotaje (α), el cual se define como el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del fuselaje y un plano inclinado, por debajo del cual la visual del piloto queda bloqueada por alguna parte del avión. Otro de los parámetros es el ángulo de cabeceo (β) que forman un

plano horizontal con el eje del fuselaje, durante la aproximación a pista. Pocos aviones se acercan a la pista según la horizontal, ya que normalmente cabecean en ambos sentidos.

Se ha comprobado experimentalmente, que tres segundos es aproximadamente el tiempo mínimo de reacción de los pilotos para lograr que el avión maniobre, después de que los pilotos han observado una ayuda visual.



PARÁMETROS DE VISIÓN..

Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

donde

- Φ : ángulo de trayectoria de planeo.
- α : ángulo de visión del puesto de pilotaje.
- β : ángulo de cabeceo.
- VR : alcance visual.
- H : segmento original de alcance visual.
- h : altura de trayectoria de planeo por encima de la pista.
- θ : ángulo formado por VR con la horizontales.

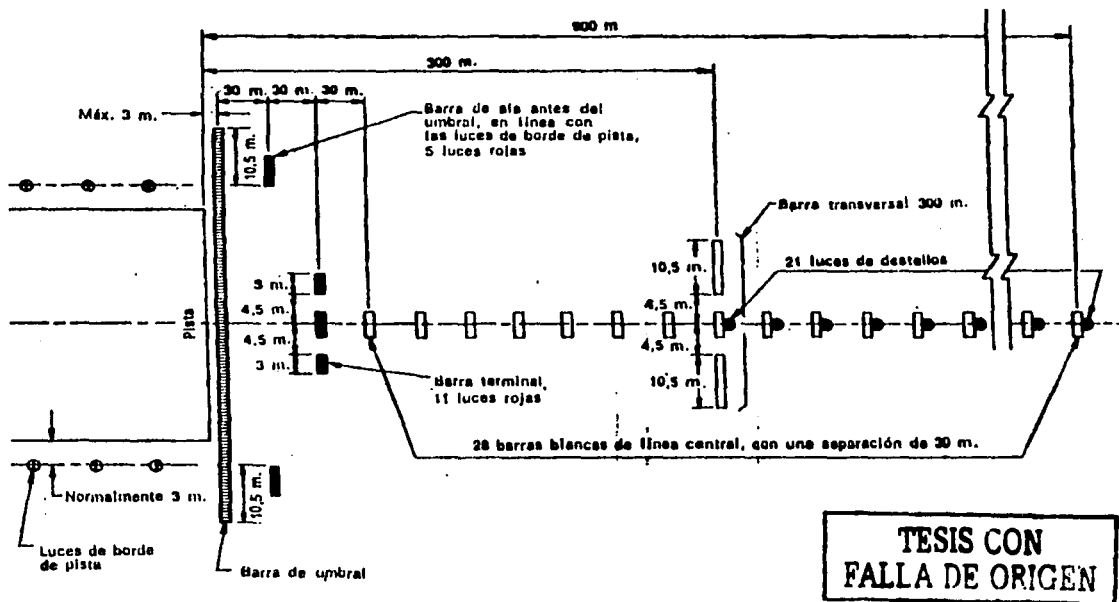
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN







Debido a la diferencia en alcance visual oblicuo, las luces de aproximación tienen que reunir unas condiciones fotométricas diferentes a las luces del umbral y pista. En general, se requiere mucha mayor intensidad en el sistema de iluminación de aproximación y especialmente en las unidades luminosas situadas hacia el exterior. Igualmente, debe garantizarse una identificación especial, como las luces de destellos de alta densidad, en aquellos lugares donde la visibilidad es extremadamente mala.

Durante la aproximación final en el aterrizaje, el piloto debe tomar la decisión de completarlo o proceder a una *aproximación frustrada*. La identificación del umbral, es el factor principal en la decisión del piloto para aterrizar o no (a una altura de 15 m medida a partir de la pista hasta los ojos del piloto), es por esto que a esta zona

se le da una gran importancia en cuanto a iluminación se refiere para la realización del aterrizaje.

En los grandes aeropuertos con ayudas visuales luminosas, el umbral queda identificado mediante una línea completa de luces verdes que se extienden a través del ancho total de la pista, tal y como se muestra en la figura.



-  Fila continua de luces verdes con espacios de 1.5 metros.
-  5 luces blancas con espacios de 0.9 metros.
-  8 luces blancas con espacios de 1.5 metros.
-  Luces de destello en secuencia lineal.
-  3 luces rojas con espacios de 1.5 metros.
-  5 luces rojas con espacios de 0.9 metros.

SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE APROXIMACIÓN.
 Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

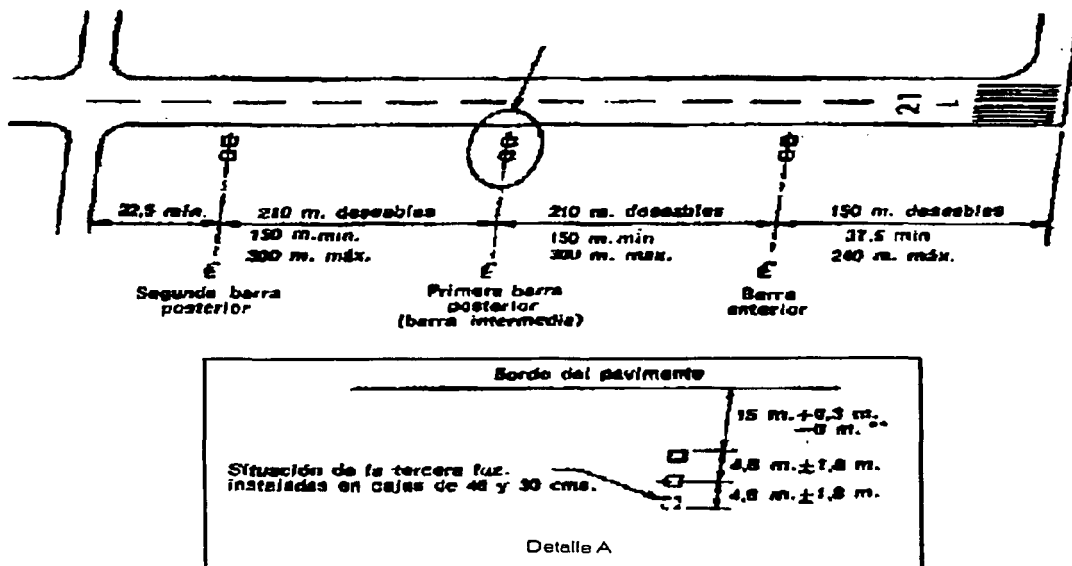
Después de cruzar el umbral, los pilotos tienen que tomar contacto con el pavimento y rodar sobre la pista. Las ayudas visuales en pista para esta fase, deben proyectarse para suministrar a los pilotos una información sobre la alineación, desplazamiento lateral, guiñada y distancia. Las luces deben situarse de tal forma que los pilotos puedan interpretarlas fácilmente.

Como ayuda para definir la trayectoria de planeo deseada, en condiciones atmosféricas relativamente buenas, se ha desarrollado un sistema óptico conocido como PAPI²³, el cual consistirá en una barra de ala con cuatro elementos de lámparas múltiples (o sencillas por pares) de transición definida, situados a intervalos iguales. El sistema se coloca al lado izquierdo de la pista, a menos que sea materialmente imposible.

La barra de ala de un PAPI está construida y dispuesta de manera que el piloto que realiza la aproximación:

- a. Vea rojas las dos luces más cercanas a la pista y blancas las dos más alejadas, cuando se encuentre en la pendiente de aproximación o cerca de ella.
- b. Vea roja la luz más cercana a la pista y blancas las tres más alejadas, cuando se encuentre por encima de la pendiente de aproximación, y blancas todas las luces en posición más elevada.
- c. Vea rojas las tres luces más cercanas a la pista y blanca la más alejada, cuando se encuentre por debajo de la pendiente de aproximación, y rojas todas las luces en posición más baja.
- d. Cuatro rojas en aproximación muy baja.
- e. Cuatro blancas en aproximación muy alta.

²³ PAPI. Indicador de Precisión de Aproximación a la Pista. (Precision Approach Path Indicator)

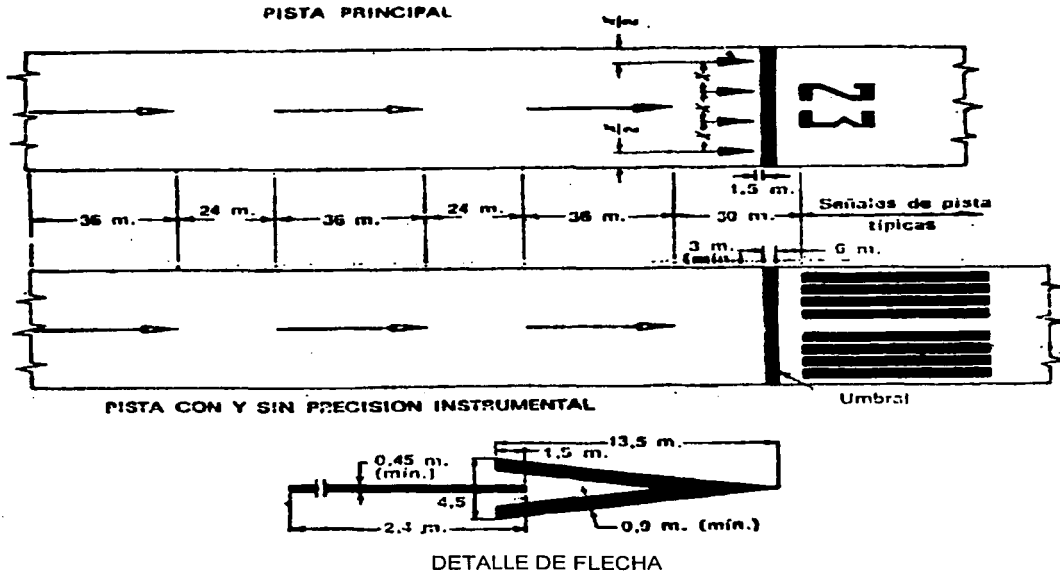


DISPOSICIÓN DE LOS INDICADORES VISUALES DE LA PENDIENTE DE APROXIMACIÓN.
 Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

Las luces de identificación de final de pista, se instalan en los aeropuertos en los que no existen luces de aproximación y además se requiere dar a los pilotos una identificación visual positiva del final de pista. El sistema consta de un par de luces de destello blancas sincronizadas y situadas a cada lado del umbral de pista y se utilizan cuando no hay una visibilidad adecuada.

Con objeto de ayudar a los pilotos que dirigen su avión hacia las pistas de vuelo y a las calles de rodaje, los pavimentos se han marcado con líneas y números. Estas marcas son de utilidad durante los periodos diurnos y nocturnos, y en sus maniobras en el aeropuerto. El color blanco es el que se utiliza para marcar las pistas de vuelo y el color amarillo es el utilizado en las calles de rodaje y zona de estacionamiento.

El inicio de cada pista se marca con un número que indica el azimut magnético de la pista en la dirección del aterrizaje. Una serie de pistas adyacentes, se designará por el número entero más próximo por defecto a la décima parte del azimut magnético y la otra serie de pistas adyacentes, se designará por el número entero más próximo por exceso a la décima parte del azimut magnético.



SEÑALIZACIÓN DE UN UMBRAL DESPLAZADO.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos.

La visibilidad meteorológica y techo de nubes se define, con base en la visibilidad ya sea de día o de noche. En la noche, es la distancia desde la cual una persona puede ver una luz de 25 candelas. Durante el día, es la distancia a la que puede verse un círculo negro bajo un ángulo visual de un grado. La visibilidad meteorológica se asocia también, con la altura de la parte inferior de una nube densa por encima de la superficie del aeropuerto, esta altura se conoce como *techo de nubes*.

Aunque los meteorólogos han utilizado varias definiciones de visibilidad, en la correspondiente a una pista de vuelo se utiliza el concepto de alcance visual en la pista (RVR), que es la distancia a la que el piloto puede ver las luces de alta intensidad de borde de pista. El RVR se determina mediante medidas transmismétricas en el lado de la pista cercano al umbral y su clasificación se realiza con respecto a la intensidad instalada de las luces de borde y si es de día o de noche.

Para operaciones de aterrizaje principalmente, las visibilidades en pistas se han clasificado en tres categorías. Los tres grupos se definen en términos de RVR y de *altura de decisión*. Éstos se basan en la habilidad de los pilotos para obtener referencias de las indicaciones visuales, más que de los instrumentos que obran en la cabina del piloto. Si los pilotos son incapaces de ver un suficiente número de señales indicativas a la altura de decisión, el avión deberá abortar el aterrizaje.

Categoría.	RVR. (m)	Altura de decisión. (m)
I	Mayores de 720	60.
II	360-720	30.
III a	210-360	Ninguna.

DIFERENTES CATEGORÍAS DE VISIBILIDAD.
Fuente. Robert Horonjeff. Diseño y Planificación de Aeropuertos

VIII. CONCLUSIONES

Existen diferentes elementos que afectan los Sistemas de Pistas que deben ser considerados para poder llevar a cabo la planeación preeliminar, el cálculo del proyecto definitivo y la construcción de las mismas.

En esta tesis, se estudiaron factores como: longitud, meteorología, geometría, capacidad, resistencia de pavimentos, drenaje, radioayudas y ayudas visuales a las aeronaves, mencionando las características que cada una debe presentar, según manuales y normas internacionales (Anexo 14 de la OACI), para que las pistas presenten las condiciones mínimas de seguridad que requieren las aeronaves y por consiguiente los pasajeros y la carga; todo esto con el fin de que el enlace entre el transporte aéreo y el terrestre se complete siempre con éxito.

En mi opinión, existen dos factores fundamentales que analizar y en los que se debe poner énfasis al realizar cualquier proyecto de pistas. Estos son: la longitud de pistas y la orientación de las mismas, sin importar que al llevar a cabo el proyecto, la construcción determine una carpeta de pavimento rígido o flexible. Por ello realicé dos ejemplos del cálculo de la longitud de pistas, uno por medio del método de Correcciones y el otro por el método de los Manuales de Vuelo, ambos para un aeropuerto de aviación civil. Para el ejemplo de Manuales de Vuelo, se tomó un avión de diseño tipo Boeing 747, ajustando pesos máximos y longitud final con un aeronave de tipo DC-10.

Utilizando el método de Correcciones, la longitud de pista requerida al inicio para despegue era de 1,700 m y conforme se le fueron aplicando las correcciones por temperatura, elevación y pendiente, la longitud requerida en un inicio, se fue incrementando hasta una longitud de 2,035 m. Aplicando este mismo método, se hizo únicamente la corrección por temperatura a la longitud requerida para aterrizaje para así poder determinar cual es la longitud total a utilizar. Obteniendo de 2,100 m (longitud requerida para aterrizaje) una longitud corregida de 2,175 m, que es la longitud a tomar para este ejemplo, por ser mayor que los 2,035 m de longitud corregida para el despegue.

Con el método de los Manuales de Vuelo, la longitud de pista que se obtuvo tomando éstos últimos, (de un Boeing 747) con las restricciones correspondientes por peso aplicables para la obtención de las longitudes a cada tipo de configuración de ángulo de aletas y tipo de combustible, se obtuvo que el peso real de despegue máximo permisible es de 285,000 Kg. por lo que la longitud mínima requerida para este tipo de aeronave es de 3,450 m.

La determinación de la orientación de una pista y su designación, nos ayuda a conocer el ángulo de azimut que deberá tener esta, y la importancia que los vientos tienen en la zona, debido a que estos afectan directamente las operaciones que las aeronaves van a realizar, ya que los vientos nos pueden

**SISTEMAS DE PISTAS DE AEROPUERTOS.
FELIPE ZAMBRANO DE LUCIO.**

ayudar al frenado del avión (en el caso de aterrizaje), o ayudan a que estos obtengan su velocidad de despegue en un tiempo y distancia menor. Si no se tomaran en cuenta, provocarían que las aeronaves salieran de las pistas antes de obtener estas velocidades o no lograrían aterrizar sobre la pista a causa de la fuerza del viento en alguna otra dirección.

Por lo que a pavimentos se refiere, se tiene que es de primordial importancia conocer los espesores de estos, puesto que son los que soportan las cargas del avión ya sea en las operaciones de aterrizaje o despegue y es en los pavimentos en donde se lleva a cabo el toque inicial del avión con tierra y donde el avión deja de tener contacto con el suelo en el despegue, por lo que se señalaron algunas de las consideraciones a tomar en cuenta para el cálculo y diseño de los espesores.

Sabemos también que la existencia de un buen sistema de drenaje para las pistas, calles de rodaje y plataformas, es de gran importancia puesto que el drenaje es el encargado de la evacuación del agua (superficial y/o subterránea), para proporcionarle la máxima seguridad al avión y la mayor duración a los pavimentos. Es por esto que si se llegan a formar charcos sobre las pistas, éstos pueden resultar peligrosos para las operaciones de despegue y aterrizaje de las aeronaves (hidroplaneo), además de que un mal de drenaje de pistas, calles de rodaje y plataformas ayuda al deterioro de los pavimentos.

Las ayudas visuales y las radioayudas, son importantes también, ya que los pilotos necesitan de ellas para la realización del aterrizaje o despegue del aeronave (según sea el caso). Aunque ésta tenga la mayor tecnología, el piloto es quien guía las computadoras y los instrumentos, tanto electrónicos como mecánicos para realizar satisfactoriamente y con la mayor seguridad las aproximaciones a la pista y que los controladores puedan equilibrar el tráfico de aeronaves para los despegues o aterrizajes que se lleven a cabo en horas que presenten la mayor demanda del día.

Como conclusión final, quiero mencionar que se presentan en esta tesis las características y factores que se deben estudiar para llevar a cabo la realización de un proyecto de pistas seguro, eficiente y económico en las etapas de planeación, construcción y/o utilización de las mismas, todas ellas reguladas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), por lo que se puede aplicar a cualquier proyecto de Pistas realizado o planificado no solo en México, sino que en otros países que se encuentren en dicha organización.

Bibliografía

- Organización de Aviación Civil Internacional. "ANEXO 14". Vol. I. Diseño y Operaciones de Aeródromos. 1ª Edición. 1990.
- Organización de Aviación Civil Internacional. "MANUAL DE PROYECTO DE AERÓDROMOS". Parte 1 - Pistas. 2ª Edición. 1984.
- Organización de Aviación Civil Internacional. "MANUAL DE PROYECTO DE AERÓDROMOS". Parte 2 - Calles de Rodaje, Plataformas y Apartaderos de Espera. 2ª Edición. 1983.
- Organización de Aviación Civil Internacional. "MANUAL DE MÉTODOS PARA LA OBSERVACIÓN Y LA INFORMACIÓN DEL ALCANCE VISUAL EN LA PISTA". 1ª Edición. 1981.
- Frederick S. Meritt. "MANUAL DEL INGENIERO CIVIL". Vol. III. 1ª. Edición en español. Mc. Graw Hill. 1987.
- Robert Horonjeff. "DISEÑO Y PLANIFICACIÓN DE AEROPUERTOS". 3ª Edición. Mc. Graw Hill. 1983.