

72
291.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“ ANALISIS GEOMETRICO DE LA ZONA
AERONAUTICA DE UN AEROPUERTO ”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
HIPOLITO MARTELL FLORES

DIRECTOR DE TESIS: ING. FEDERICO DOVALI RAMOS



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-148/95

Señor
HIPOLITO MARTELL FLORES
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**.

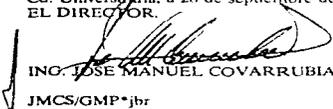
"ANALISIS GEOMETRICO DE LA ZONA AERONAUTICA DE UN AEROPUERTO"

- I. INTRODUCCION
- II. ESPACIOS AEREOS
- III. PISTAS
- IV. CALLES DE RODAJE
- V. ASPECTOS COMPLEMENTARIOS
- VI. PAVIMENTOS
- VI. 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 HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 20 de septiembre de 1996.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*jbr

**DEDICO CON CARIÑO EL
PRESENTE TRABAJO A MIS PADRES,
HERMANOS, FAMILIARES Y AMIGOS.**

**AGRADEZCO ESPECIALMENTE AL INGENIERO
FÉDERICO DOVALI RAMOS POR SU ENSEÑANZA
COMO PROFESOR, ASI COMO POR SU APOYO Y GRAN
INTERÉS EN EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.**

**AGRADEZCO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO Y LOS
CATEDRÁTICOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA.**

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1. ESPACIOS AÉREOS	
1.1 NECESIDAD DE ESPACIOS AÉREOS LIBRES	3
1.2 ANEXO 14	13
1.3 OPERACIÓN DE AERONAVES	30
2. PISTAS	
2.1 NÚMERO Y ORIENTACIÓN	61
2.2 DETERMINACIÓN DE LONGITUDES	79
2.3 MARGENES DE PISTA, FRANJAS Y ÁREAS DE SEGURIDAD	111
2.4 ANCHURAS Y PENDIENTES	117
3. CALLES DE RODAJE	
3.1 NECESIDAD DE LAS CALLES DE RODAJE	122
3.2 TIPOS DE CALLE DE RODAJE	129
3.3 ANCHOS Y SEPARACIONES	144
3.4 SUPERFICIES DE ENLACE	146
4. ASPECTOS COMPLEMENTARIOS	
4.1 PLATAFORMAS	157
4.2 ANCHOS Y SEPARACIONES	178
4.3 EFECTOS DEL CHORRO DE LOS REACTORES Y EL RUIDO EN LA ZONA AERONÁUTICA	180
5. PAVIMENTOS	
5.1 GENERALIDADES	196
5.2 BASES Y SUB-BASES	198
5.3 DISEÑO DE ESPESORES	203
5.4 RELACIÓN CON LA LONGITUD DE PISTA	235
6. CONCLUSIONES	239

INTRODUCCIÓN.

El transporte aéreo en la actualidad es parte fundamental del sistema de transporte de cualquier nación. Ya que ofrece el máximo ahorro de tiempo y dinero en transporte de pasajeros a grandes distancias, y el menor tiempo posible de viaje tanto de pasajeros como de carga en distancias pequeñas.

Por otra parte, el desarrollo del transporte aéreo de un país juega un importante papel en su economía, ya que exigirá la existencia de aeropuertos que generarán empleo y desarrollo económico en el sitio donde estén ubicados. A su vez, su construcción deberá ser justificada por la demanda de transporte aéreo en su zona de influencia. Por lo que el tipo y magnitud de un aeropuerto y sus operaciones, son también un importante indicador del grado de desarrollo económico de dicha zona, así como su número y distribución en un país serán reflejo de la prosperidad nacional.

Por lo anterior, el funcionamiento óptimo de cada aeropuerto durante cada etapa de su vida útil, será de gran importancia para el desarrollo económico de su zona de influencia, sin embargo, la falta de capacidad para operar el tráfico aéreo debido al incremento en su demanda o al cambio en sus características, podría generar la necesidad de restringir las operaciones para determinados aviones después de un cierto periodo de tiempo, o de algunos para los cuales las dimensiones físicas de la zona aeronáutica fueran insuficientes. Con lo que se anularían, o al menos se disminuirían los beneficios que el aeropuerto podría traer a su zona de influencia.

Además, los altos costos de la infraestructura aeronáutica y las limitaciones para su emplazamiento, nos obligan a procurar el mayor beneficio de estas, que se logrará sólo mediante la optimización de su operación.

Ahora bien, ya que la operación óptima de un aeropuerto durante su vida útil, será función del correcto desarrollo de la zona aeronáutica en cada etapa del proyecto. En el presente trabajo de tesis se analizan los criterios de diseño de los elementos que integran dicha zona, su interrelación, y la relación de estos con los aspectos aeronáuticos que influyen para realizar las operaciones de aterrizaje y despegue.

Se hace notar los factores importantes para el diseño de los elementos de la zona aeronáutica y para la planeación de su desarrollo. Se ha procurado tratar un elemento en cada capítulo, siguiendo un orden congruente con el proceso lógico de diseño de un aeropuerto y el diseño de cada elemento se ilustra mediante un ejemplo. Los datos necesarios para su desarrollo así como el procedimiento seguido aparecen en el mismo capítulo.

Además, en cada capítulo se concentra la información actualizada sobre dimensiones especificadas y las recomendaciones para el diseño del elemento analizado, considerando que los conceptos que se manejan serán útiles aun cuando las especificaciones cambien. Esperando que el presente trabajo sea útil como guía para iniciar el diseño y planeación de futuros aeropuertos así como para el desarrollo de los actuales.

CAPÍTULO 1. ESPACIOS AÉREOS.

1.1 NECESIDAD DE ESPACIOS AÉREOS LIBRES.

Uno de los factores más importantes para el funcionamiento de un aeropuerto y la fluidez del tránsito aéreo, es la disponibilidad de los espacios libres en sus alrededores y el grado de libertad que puedan tener los aviones para realizar movimientos. Debido a que a mayor libertad de maniobras en el espacio aéreo, se tendrán más opciones para el diseño de rutas de entrada y salida de las aeronaves, pudiendo brindar mayor sencillez, comodidad y seguridad.

El grado de libertad en el espacio aéreo, esta determinado por las características naturales del terreno y de las construcciones que se encuentran dentro y alrededor del mismo. Y afecta el diseño de la zona aeronáutica ya que puede provocar restricciones respecto a las longitudes de despegue y aterrizaje. Además, tanto las maniobras de aproximación previa al aterrizaje como las de ascenso en el despegue, requieren espacios aéreos libres de obstáculos en el interior del aeropuerto. Considerando obstáculos a aquellos objetos que pudieran dificultar las maniobras o a los que simplemente interrumpen la visibilidad.

El hecho de no tomar en cuenta o subestimar la importancia de los espacios que deben estar libres de obstáculos puede traer en el futuro graves problemas tanto de seguridad como de eficiencia e inclusive puede causar la inutilidad de las pistas para ser utilizadas por alguno de los aviones que operará en el aeropuerto. Por lo que se deben satisfacer tanto las necesidades de espacio básicas para

todos los aviones, como las individuales que dependerán de las características de cada avión y de las maniobras que debe realizar desde que sale de ruta hasta el aterrizaje, de manera que será necesario realizar el estudio de espacios aéreos basándose en 2 criterios. El primero se refiere al establecimiento de espacios mediante superficies envolventes imaginarias dentro de las cuales no deberán existir obstáculos con la finalidad de que todo avión cuente con un mínimo de seguridad y visibilidad durante las maniobras de despegue, la aproximación al aeropuerto y la aproximación frustrada en su caso. Las recomendaciones y especificaciones acerca de dichas superficies aparecen en el Anexo 14 de la O.A.C.I. y se tratarán más adelante.

El segundo criterio se basa en la construcción de procedimientos de vuelo y por lo tanto deben diseñarse para cada tipo de aviones, lo que proporcionará una protección individualizada. Las recomendaciones respectivas están enfocadas a los diseñadores de procedimientos dentro del documento PANS-OPS (doc. 8168 [O.A.C.I.]). Las superficies determinadas de este modo, tienen por objeto dar seguridad a los aviones al realizar sus procedimientos de salida de ruta y aproximación así como los de ascenso posterior al despegue hasta tomar ruta, aún fuera de las zonas protegidas por las superficies del "anexo 14".

Este último criterio, surgió debido a que no todos los aviones pueden adoptar las mismas pendientes de ascenso y descenso, su maniobrabilidad es diferente y sus trayectorias hacia o desde las rutas son distintas, lo que hace necesaria la construcción de procedimientos individuales para cada tipo de avión que vaya a operar en el aeropuerto.

Consiste en la limitación de obstáculos mediante el establecimiento de canales imaginarios de protección que contienen la trayectoria que se prescribe para las diferentes operaciones. Estos canales se definen por anchos de seguridad y alturas mínimas de franqueamiento de obstáculos para cada procedimiento, de manera que se definirán en función de las necesidades de los aviones y no de las características de las pistas como las superficies del "anexo 14".

Si el sitio donde se planea emplazar un nuevo aeropuerto cumple tanto con las superficies del "anexo 14" como con los espacios requeridos por los procedimientos de los aviones que operarán en él, podría pensarse que es una buena localización y continuar con el diseño de las pistas. Sin embargo, el no cumplir con los espacios requeridos por cualquiera de los 2 criterios obligará a pensar en opciones como el diseño de procedimientos más complicados para los aviones, reorientación de pistas (si los vientos lo permiten) e incluso en cambiar el sitio de emplazamiento del futuro aeropuerto si se demuestra que la opción en estudio será ineficiente, antieconómica o limitará el uso del aeropuerto para algunos aviones.

Entonces, es claro que la precisión del estudio de espacios aéreos y la decisión que se tome en base a sus resultados al momento de elegir un sitio para un futuro aeropuerto, tendrán efectos permanentes en la seguridad de los aviones tanto por los obstáculos difíciles de franquear como por la dificultad de las maniobras que tengan que realizar al establecer procedimientos de aproximación con varios giros o pendientes muy pronunciadas. Por otra parte, se podría afectar la velocidad de las operaciones, ya que en la mayoría de los casos, una aproximación directa será mucho más rápida que una aproximación en circuito o una aproximación en la que además fuera necesario rodear un cerro u otro

en funcionamiento que cumple con las superficies del anexo 14 y algunos aviones operan con procedimientos en los que las trayectorias de ascenso indican que se sobrevuelan unos edificios, pero cumplen apenas con las distancias mínimas de seguridad al pasar sobre estos, si se tuviera la necesidad de aumentar la longitud de pista debido a la creciente demanda de operaciones de aviones más grandes, nos encontraríamos (aunque se cumpliera con el anexo 14) con que estos aviones que fueron el motivo de la ampliación, no podrían operar en el aeropuerto, pues aunque la pista fuera apropiada, los edificios serían un obstáculo tanto para el ascenso como para la aproximación, por lo que habría que construir nuevos procedimientos para ellos con más virajes y/o mayores pendientes y adaptarlos de modo que fueran compatibles con los procedimientos de los demás aviones que ya operaban en el aeropuerto, o bien partiendo de los nuevos procedimientos rediseñar los anteriores.

Ahora bien, el estudio sobre diseño de nuevos procedimientos y su adaptación con los antiguos es labor del personal de "control aéreo" y también intervendrán otros especialistas que se encargarán de la iluminación de las pistas y la instalación de antenas para las radioayudas por lo que el proyectista coordinador deberá ser capaz de manejar grupos multidisciplinarios, pero lo más importante será saber evaluar las prioridades de cada especialidad y encontrar entre todas las combinaciones posibles aquella solución que proporcione las mayores ventajas.

Por lo tanto, para poder elaborar, coordinar y evaluar todas las posibles opciones de solución para la ampliación o el diseño de un aeropuerto, es necesario que el director del proyecto tenga conocimientos básicos de todas las especialidades. En el presente trabajo no se pretende abarcar más que el análisis geométrico de la zona aeronáutica, sus principios de diseño y la

influencia del ruido y el chorro de gases de los aviones sobre el mismo.

Como se verá durante el desarrollo de cada capítulo, el diseño de la zona aeronáutica es el que condiciona, restringe y se complementa de los demás diseños y estudios del proyecto total. A continuación, se dará una breve explicación sobre las operaciones de aproximación y ascenso, del anexo 14 y el diseño de procedimientos, con el fin de entenderlos conceptualmente, conocer las recomendaciones actuales de la O.A.C.I. y poder hacer comentarios al respecto.

Las situaciones que pueden presentarse más comúnmente en las maniobras antes mencionadas son las siguientes:

A) APROXIMACIÓN PREVIA

AL ATERRIZAJE.

1. CIRCULANDO (VFR)

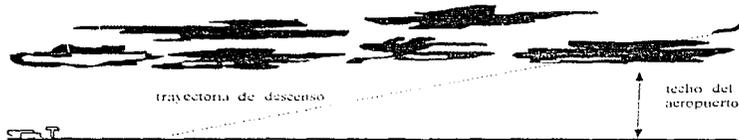
2. DIRECTA (IFR / IMC)

3. FRUSTRADA

B) ASCENSO INMEDIATO AL
DESPEGUE.

La aproximación circulando consiste en que el avión rodee la pista durante su descenso siguiendo bajo condiciones visuales (VFR) un circuito prestablecido hasta ingresar en la pista en dirección contraria al viento.

Por otra parte la seguridad con que se realicen e incluso la posibilidad de realizar operaciones de aterrizaje y despegue en un aeropuerto en condiciones visuales, esta en función de la visibilidad que desde el aire se tenga de las pistas y sus señalamientos que a su vez dependen de las condiciones meteorológicas como lluvia, nieve y altitud de las nubes sobre la elevación del aeropuerto la cual es conocida como "techo".



Debido a lo anterior y a la importancia individual de cada aeropuerto, se ha instalado en algunos de ellos radio-ayudas para la navegación con el fin de guiar a los pilotos durante las maniobras cuando la visibilidad no sea óptima, y en algunos otros aeropuertos de mayor importancia existen sistemas completos para guiar el avión durante la aproximación y el aterrizaje inclusive con visibilidad nula, éste sistema se conoce como ILS (instrument landing system) y se comentará sobre él más adelante.

En base a esta diferencia relacionada con la capacidad de realizar operaciones con más o menos dependencia de las condiciones climáticas, la O.A.C.I. ha hecho una clasificación de pistas que se menciona a continuación y que fué tomada del Anexo 14.

Pista de vuelo visual: son pistas diseñadas solo para pequeños aviones que utilizan procedimientos de aproximación visual.

Pista de vuelo instrumental: son pistas provistas de equipos electrónicos de ayuda a la navegación que pueden ser desde una guía para aproximación, un radar de aproximación de precisión o un sistema de aterrizaje ILS, por lo que existirán varios tipos de pistas instrumentales.

El primer tipo es el de las "pistas para aproximaciones que no sean de precisión", estas cuentan con ayudas visuales y una ayuda no visual que proporciona al menos una guía direccional adecuada para la aproximación directa.

El segundo tipo es el de "pistas para aproximaciones de precisión de categoría I", estas pistas son servidas por radio-ayudas ILS y por ayudas visuales, el sistema está diseñado para guiar con seguridad las aproximaciones hasta una "altura de decisión" de 60 m (200 ft), a partir de dicha altitud el piloto continuará el descenso en condiciones visuales o iniciará el procedimiento de aproximación frustrada, se considera además que el piloto tiene un alcance visual en la pista de alrededor de 800 m.

Las "pistas para aproximaciones de precisión de categoría II", son pistas equipadas con radio-ayudas ILS y ayudas visuales destinadas a operaciones con una altura de decisión de 30 m (100 ft) y un alcance visual de la pista de 400 m.

Las "pistas para aproximaciones de precisión de categoría III", son pistas equipadas con radio-ayudas ILS que pueden guiar al avión hasta la superficie de la pista y a lo largo de la misma, dentro de esta categoría existen 3 clases que son:

A) Destinadas a operaciones hasta un RVR (alcance visual en la pista) del orden de 200 m y sin altura de decisión aplicable.

B) Destinadas a operaciones hasta un RVR del orden de 200 m y sin altura de decisión aplicable, utilizando ayudas visuales para el rodaje.

C) Destinadas incluso a operaciones en la pista y calles de rodaje sin depender de referencias visuales.

Nota: las especificaciones del IIS relacionadas con cada categoría aparecen en el anexo 10, vol.1, parte 1, cap.3, OACI.

Como podemos ver, a mayor precisión y complejidad de las ayudas electrónicas a la navegación se tendrá menos necesidad de visibilidad y por lo tanto un aeropuerto podrá operar con "techos" menores e independientemente de las condiciones atmosféricas.

De los diagramas anteriores y habiendo comentado la razón de la clasificación de pistas, en claro que en muchas ocasiones el piloto realizará las maniobras prácticamente sin visibilidad y dependiendo totalmente de las ayudas electrónicas de navegación. Por lo que el emplazamiento adecuado de las mismas será un factor de vital importancia para la navegación y que por lo tanto no podrá supeditarse a otros factores del diseño.

Además, el piloto deberá tener la seguridad de que no existen obstáculos para poder realizar las maniobras, por lo que a continuación se describirán los principios de limitación.

1.2 ANEXO 14.

La O.A.C.I. ha establecido en su publicación conocida como " Anexo 14 " la forma y las dimensiones de las superficies envolventes de los espacios aéreos que deberán quedar libres de objetos alrededor de los aeropuertos para poder realizar las operaciones con seguridad y evitar que el aeropuerto que inutilizado por los diversos obstáculos que pudieran proyectarse en el espacio aéreo, como obstáculos naturales o aquellos consecuencia del desarrollo urbano en el futuro. Dicho documento considera para sus recomendaciones una atmosfera estandar con viento calma, temperatura de 15 grados centigrados y una presión barométrica de 760 mm Hg (1013 milibares)(101.3 KN/m).

En caso de existir objetos que penetren las superficies limitadoras de obstáculos especificadas, podría cambiarse en ciertas circunstancias la altura de franqueamiento de los obstaculos en el procedimiento de aproximación por instrumentos o en el correspondiente de aproximación visual en circuito, éste último se vera más adelante al final del capitulo cuando se trate el tema de operación de aeronaves.

Los aeropuertos son diferentes entre si dependiendo del tipo de aviones que operan en ellos, de manera que hay aeropuertos pequeños solo para monomotores de piston, jets particulares y bimotores de hélice que se conocen como " aeropuertos para la aviación general ", otros aeropuertos con pistas más largas, mejor pavimentadas y capaces de operar aviones medianos de reacción como los B-737, B-727 y DC-9-30 se conocen como " de mediano alcance " y se utilizan principalmente para vuelos nacionales, los aeropuertos de mayor tamaño y con capacidad para operar cualquier avion comercial se conocen como " de largo alcance " y se utilizan como conexiones o puntos de partida y terminales de vuelos tanto nacionales como internacionales. Por lo anterior es claro que se necesita una

nomenclatura para poder identificar la importancia y capacidad de un aeropuerto determinado, por otra parte a lo largo del presente trabajo se hará referencia a ella constantemente, dicha nomenclatura ha sido definida por la O.A.C.I. como "Clave de referencia de aeródromo" y está compuesta de 2 elementos que se relacionan con las características y dimensiones de los aviones de mayor tamaño que pueden operar en el aeropuerto, el primer elemento es un número basado en la longitud de referencia del avión (longitud necesaria para despegar dada por el fabricante) y el segundo es una letra relacionada con la envergadura del avión y la anchura exterior entre las ruedas del tren principal de aterrizaje. En la sig. página aparece una tabla para relacionar el número de clave de un aeropuerto con sus características, dicha tabla ha sido tomada del "Anexo 14".



Arriba: puede apreciarse un avion B-74 en la configuración de aterrizaje. (en la actualidad es el avion con mayores dimensiones y requiere pistas de clave 4D o 4E).

Núm. de clave	Elemento 1 de la clave		Elemento 2 de la clave	
	Longitud de campo de referencia del avión	Letra de clave	Envergadura	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal *
1	Menos de 800 m	A	Hasta 15 m (exclusive)	Hasta 4.5 m
(exclusive)				
2	Desde 800 m hasta 1200 m (exclusive)	B	Desde 15 m hasta 24 m (exclusive)	Desde 4.5 a 6m (exclusive)
3	Desde 1200 m hasta 1800 m (exclusive)	C	Desde 24 m hasta 36 m (exclusive)	Desde 6 a 9m (exclusive)
4	Desde 1800 m en adelante	D	Desde 36m hasta 52 m (exclusive)	Desde 9 a 14m (exclusive)
		E	Desde 52 m hasta 65 m (exclusive)	Desde 9 a 14m (exclusive)

* Distancia entre los bordes exteriores de las llantas del tren de aterrizaje principal

A continuación se describirán las superficies limitadoras de obstáculos y su finalidad en cada etapa de las operaciones de aterrizaje y despegue.

La superficie horizontal externa, tiene la finalidad de restringir la altura de los obstáculos en las zonas que rodean el aeropuerto hasta una distancia considerable que proporcionará mayor visibilidad a los pilotos y más posibilidades para los trayectos en los circuitos de espera.

1. SUPERFICIE HORIZONTAL EXTERNA.

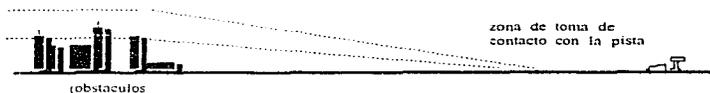
Esta superficie describe un cilindro cuya base tiene como centro el aeropuerto y se desarrolla sobre la altura de referencia del mismo. Aunque su uso es poco común, la experiencia a lo largo del tiempo ha demostrado que la construcción de estructuras de gran altura en las zonas circundantes al aeropuerto, aunque estén situadas más allá de las

áreas restringidas por la superficie horizontal interna que se mencionará más adelante, puede originar graves dificultades para las operaciones, por tanto es recomendable restringir la construcción de estructuras hasta una altura menor que la de la superficie horizontal externa en un área delimitada por la misma.

Las dificultades que podrían causarse a la navegación en caso de tener obstáculos encima de la superficie en cuestión podrían traer consecuencias de seguridad o bien de eficiencia. Para evitar los riesgos de una colisión deberán examinarse los proyectos de construcción de postes, torres y edificios con el fin de reubicarlos o restringir su altura ya que éstas zonas serán utilizadas por los aviones en circuitos visuales o bien en trayectorias de descenso y despegue por instrumentos.

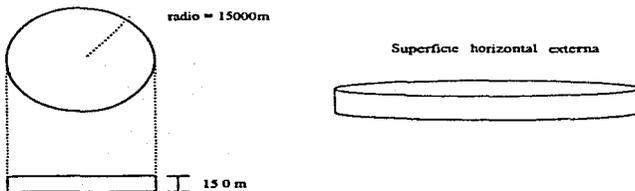
En caso de que existieran estructuras por arriba de dicha superficie, sería necesario adoptar alturas de vuelo mayores disminuyendo la eficiencia de las aproximaciones, ya que se afectaría la regularidad y la duración de dichas operaciones. Por ejemplo, al denegar la utilización de altitudes útiles a los aviones en los circuitos de espera obligándolos a realizar descensos más bruscos o la imposibilidad de efectuar virajes durante el ascenso o la aproximación frustrada.

Al no respetar la altura límite para los obstáculos, el avión se ve obligado a realizar la aproximación a mayor altura y por tanto la pendiente de descenso será mayor



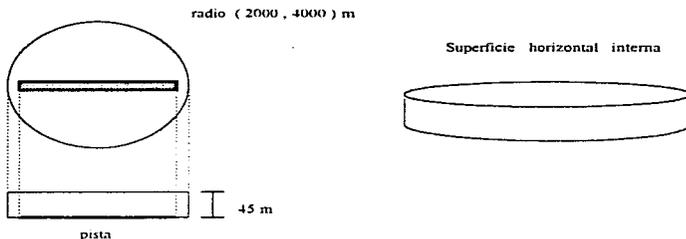
En caso de no poder evitar la construcción de alguna estructura por encima de ésta superficie, se considera que tendrán menor impacto en las operaciones si se construyen en una zona en la que ya existan otros obstáculos, ya sean estructuras o parte del relieve natural como por ejemplo montañas.

En general para ésta superficie se considerarán importantes aquellas estructuras con altura mayor de 30 m por encima del nivel del terreno donde estén situadas y también las mayores de 150 m por encima de la elevación del aeropuerto si están situadas dentro de un radio de 15000 m alrededor del centro del aeropuerto cuando el número de clave de la pista sea 3 ó 4, es decir, que su longitud sea mayor de 1200 m. Como última consideración podría ser necesario ampliar dicha superficie para que coincida con las superficies de determinación de obstáculos descritos en los PANS-OPS para cada procedimiento de aproximación que pudiera darse en un aeropuerto determinado.



2. SUPERFICIE HORIZONTAL INTERNA.

La finalidad de esta superficie es proteger el espacio aéreo para el circuito visual dentro del cual el avión debe volar antes del aterrizaje, dicha superficie será descrita por un plano horizontal sobre un aeropuerto y sus alrededores, la superficie se formará trazando en planta un círculo con centro en el punto medio de la pista y radio variable entre 2000 m y 4000 m dependiendo de la categoría de las pistas, la altura de protección de dicha superficie será para cualquier categoría de 45 m.



La superficie anterior proporciona muy buena protección para el circuito visual cuando la velocidad de los aviones no es muy alta y existe una sola pista, por lo que resulta óptima en aeropuertos para la aviación general, sin embargo, para aeropuertos de grandes dimensiones el criterio de protección del Doc. 8168 (PANS-OPS) para los espacios aéreos en que se realizará el circuito visual, es mejor. Dicha superficie de mayor complejidad se tratará en el subtema 1.3.

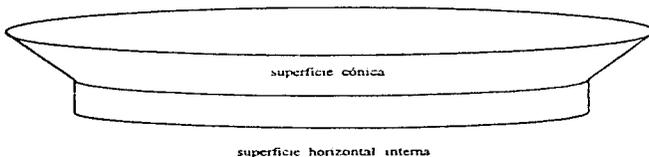
3. SUPERFICIE CÓNICA .

Es una superficie de pendiente ascendente y hacia afuera que se extiende desde la periferia de la superficie horizontal interna, su finalidad es proteger el espacio aéreo para el circuito visual en el cual el avión volará antes del aterrizaje, los límites de la superficie cónica son:

+ Un borde inferior que coincidirá con la periferia de la superficie horizontal interna.

+ Un borde superior que estará situado a una altura determinada sobre la superficie horizontal interna y su ampliación respecto al borde inferior estará en función de la altura mencionada y la pendiente de la pared lateral.

+ La pendiente de la superficie cónica se medirá en un plano vertical ortogonal a la periferia de la superficie horizontal interna que tiene como base.



Nota : Las dimensiones y ángulos de todas las superficies aparecen en una tabla que las relaciona con cada tipo y categoría de pista al final de la descripción de las mismas .

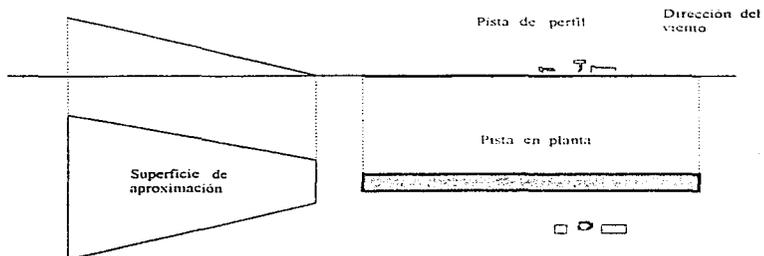
4. SUPERFICIE DE APROXIMACIÓN.

Esta superficie se describe por un plano inclinado anterior al umbral, su finalidad es mantener libre de obstáculos el espacio aéreo que los aviones utilizarán durante la fase final de la maniobra de aproximación para el aterrizaje, los límites de dicha superficie son:

+ Un borde interior de longitud especificada, horizontal y perpendicular a la prolongación del eje de la pista y situado a una distancia determinada antes del umbral.

+ Estará limitada por 2 planos laterales que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en un ángulo especificado respecto a la prolongación del eje de la pista, finalmente el borde exterior será paralelo al borde interior.

+ La elevación del borde interior será igual a la del punto medio de umbral y la pendiente de la superficie de aproximación se medirá en el plano vertical que contenga al eje de la pista.

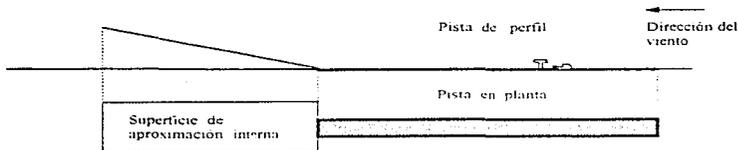


5. SUPERFICIE DE APROXIMACIÓN INTERNA.

Es la porción rectangular de la superficie de aproximación inmediatamente anterior al umbral, los límites de dicha superficie son:

- + Un borde interior que coincide con el emplazamiento del borde interior de la superficie de aproximación pero que posee una longitud propia determinada.

- + Dos planos laterales que parten de los extremos del borde interior y se extienden paralelamente al plano vertical que contiene al eje de la pista, el borde exterior será paralelo al borde interior.

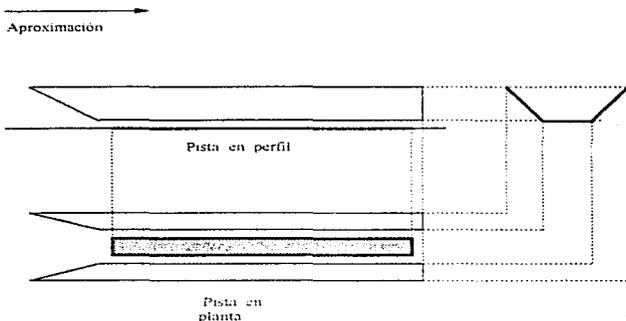


6. SUPERFICIE DE TRANSICIÓN.

La superficie de transición tiene la finalidad de mantener libres los espacios laterales de la pista y de la superficie de aproximación, dicha superficie es un prisma con sección trapezoidal que se forma a lo largo del borde de la franja de pista, tiene paredes laterales inclinadas hacia afuera cuya pendiente se medirá sobre un plano vertical perpendicular al eje de la pista, parte (de atrás hacia adelante) desde el

borde de la superficie de ascenso en el despegue hasta el borde interno de la superficie de aproximación, desde allí continuará hasta la intersección del borde de la superficie de aproximación externa con la superficie horizontal interna, esta última será el límite superior de la superficie de transición en toda su longitud.

La elevación de un punto cualquiera en el borde inferior será a lo largo del borde de la superficie de aproximación igual a la elevación de la superficie de aproximación en dicho punto, a lo largo de la franja de pista será igual a la elevación del punto más próximo sobre el eje de la pista o de su prolongación. Como consecuencia de esto último, la superficie de transición a lo largo de la franja de pista debe ser curva si el perfil de la pista es curvo, o plana si el perfil de la pista es rectilíneo, la intersección de la superficie de transición con la superficie horizontal interna debe ser también una línea curva o recta en función del perfil de la pista.



7. SUPERFICIE DE TRANSICIÓN INTERNA.

Es una superficie muy parecida a la superficie de transición pero más próxima a la pista, su finalidad es servir de superficie limitadora de obstáculos para las ayudas de navegación (ej. I.L.S.), las aeronaves y cualquier otro vehículo u objeto que deba hallarse en las proximidades de la pista, de esta superficie solo deben sobresalir los objetos montados sobre soportes frangibles, sus límites serán los siguientes:

+ Un borde inferior que comienza al final de la superficie de aproximación interna y que se extiende a lo largo del lado de la superficie de aproximación interna hasta el borde exterior de esta superficie, desde allí a lo largo de la franja paralela al eje de la pista hasta el borde interior de la superficie de aterrizaje interrumpido y desde allí hacia arriba a lo largo del lado de la superficie de aterrizaje interrumpido hasta el punto donde el lado corta la superficie horizontal interna.

El borde superior estará situado en el plano de la superficie horizontal interna.

La elevación de un punto cualquiera en el borde inferior sera:

+ A lo largo del lado de la superficie de aproximación interna y de la superficie de aterrizaje interrumpido, igual a la elevación de la superficie considerada en dicho punto.

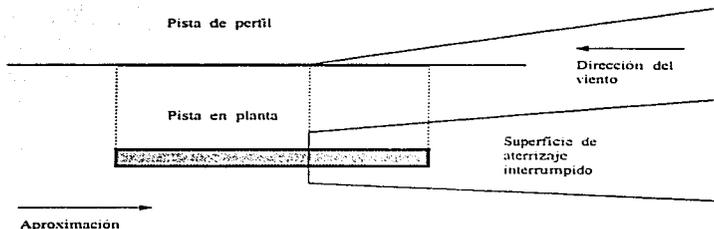
+ A lo largo de la franja de pista, igual a la elevación del punto mas próximo sobre el eje de pista o de su prolongación, como consecuencia de esto último la superficie de transición interna a la largo de la franja debe ser curva si el perfil de la pista es curvo o debe ser plana si el perfil de la pista es rectilíneo, la intersección de la superficie de transición interna con la superficie horizontal interna debe ser también una línea recta o curva dependiendo del perfil de la pista, la pendiente de esta superficie se medirá en un plano vertical perpendicular al eje de la pista.

8. SUPERFICIE DE ATERRIZAJE INTERRUMPIDO.

La superficie de aterrizaje interrumpido, tiene la finalidad de proteger el espacio aéreo que ocuparía el avión en caso de reiniciar el ascenso al no poder completar la maniobra de aterrizaje, es un plano inclinado situado a una distancia específica después del umbral que se extiende entre las superficies de transición internas, sus límites serán:

+ Un borde interior horizontal y perpendicular al eje de la pista situado a una distancia especificada después del umbral, 2 lados que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en un ángulo determinado del plano vertical que contiene al eje de la pista, finalmente un borde exterior paralelo al borde interior y situado en el plano de la superficie horizontal interna.

+ La elevación del borde interior será igual a la del eje de pista en el emplazamiento del borde interior, la pendiente de dicha superficie se medirá en el plano vertical que contenga el eje de la pista.



ZONA DESPEJADA DE OBSTÁCULOS (OFZ).

Las superficies de aproximación interna, de transición interna y de aterrizaje interrumpido forman un conjunto que se conoce como zona despejada de obstáculos (OFZ), dicha zona se mantendrá libre de obstáculos con excepción de las ayudas a la navegación aérea.

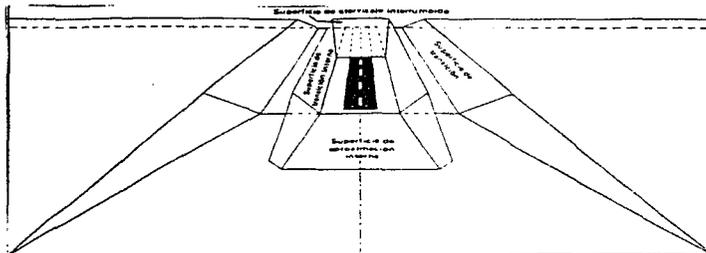
La (OFZ) que se establezca en una pista para aproximaciones de precisión con número de clave 3 o 4, tiene la intención de proteger aviones con envergadura de 60m en aproximaciones de precisión aún por debajo de los 30m y correctamente alineados a la pista para que puedan ascender con una pendiente de 3.33% y con una divergencia máxima respecto al eje de la pista de 10%, la pendiente anterior es la más baja que se permite para el aterrizaje interrumpido considerando todos los motores en funcionamiento.

Para todas las aproximaciones de precisión con número de clave 3 o 4 (con longitudes de campo de referencia mayores de 1200m) habrá una distancia de 1800m desde el umbral hasta el principio de

la superficie de aterrizaje interrumpido, la determinación de esta distancia se basa en la suposición de que el último punto en que puede iniciarse la maniobra de aproximación interrumpida es al final de la iluminación de la zona de toma de contacto y que los cambios de configuración del avión necesarios para obtener una pendiente de ascenso positiva, exigirán una distancia suplementaria de 900m que el avión recorrerá en aproximadamente 15 seg.

La pendiente de 33.33% de la superficie de transición interna corresponde a la superficie resultante de la aplicación de una pendiente de ascenso del 3.33% (que se tratará en 1.3) con una posible divergencia de 10% debida a la dispersión de los datos recopilados sobre este tipo de maniobras.

La (OFZ) para pistas de aproximación de precisión de categoría 1, con número de clave 1 o 2, tiene la intención de proteger a los aviones con envergadura de 30m para permitirles el ascenso con una pendiente de 4% y con una divergencia respecto al eje de la pista también de 10%. La pendiente de 4% es la correspondiente a la superficie de ascenso para despegue normal en este tipo de aviones. Al igual que en el caso anterior, si combinamos la pendiente de 4% con la divergencia de 10%, obtendremos una pendiente de 40% para las superficies de transición interna. La superficie de aterrizaje interrumpido comienza a 60m más allá del extremo de la pista más alejado con respecto al umbral y coincide con la superficie de ascenso para el despegue de la misma pista.



Arriba: Aparece la perspectiva de las superficies integrantes de la OFZ.

9. SUPERFICIE DE ASCENSO EN EL DESPEGUE.

Es una superficie formada por un plano inclinado situado más allá del extremo de una pista o zona libre de obstáculos, su función es proteger a los aviones durante el despegue manteniendo sin obstáculos el espacio aéreo utilizado, o manteniéndolo iluminado si no es posible eliminar los obstáculos, sus límites serán:

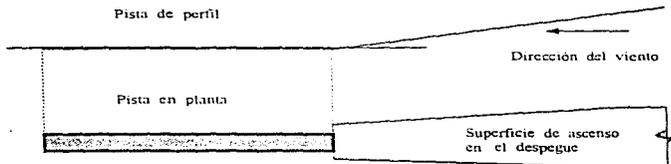
- + El borde interior será horizontal y perpendicular al eje de la pista situado a una distancia específica después del extremo de la pista o de la zona libre de obstáculos en caso de existir ésta última, su elevación será igual al punto más alto de la prolongación del eje de la pista entre el extremo de ésta y el borde interior, o la del punto más alto sobre el suelo en el eje de la zona libre de obstáculos si dicha zona existe.

- + Dos lados que parten de los extremos del borde interior y que divergen uniformemente con un ángulo determinado respecto a la derrota de despegue hasta

llegar a una anchura final también especificada, esta última anchura se mantiene a lo largo del resto de la superficie de ascenso en el despegue hasta llegar a un borde exterior horizontal y perpendicular a la derrota de despegue, la pendiente de esta superficie se medirá en el plano vertical que contenga el eje de la pista.

+ En el caso de tener una trayectoria de despegue en la que intervenga un viraje, dicha superficie será más compleja ya que contendrá las normales horizontales al eje de dicha trayectoria y su pendiente será igual a la utilizada en caso de despegue con trayectoria de ascenso rectilínea.

Las pendientes y dimensiones de esta superficie varían también dependiendo del número de clave del aeropuerto.



En la siguiente página aparece una tabla con las dimensiones y ángulos especificados por la O.A.C.I. en el "anexo 14", para la construcción de las superficies limitadoras de obstáculos que se han tratado.

Tabla 1.2 Dimensiones y pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos.

Superficies y dimensiones ^a	PISTAS DE ATERRIZAJE									
	Clasificación de las pistas									
	Aproximación visual				Aproximación que no sea de precisión				Aproximación de precisión	
	Número de clave				Número de clave				Número de clave	
III	1	2	3	4	1,2	3	4	1,2	3,4	1,2
	(25)	(31)	(41)	(51)	(60)	(75)	(93)	(91)	(100)	(121)
CONICA										
Pendiente	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Altura	23 m	15 m	11 m	100 m	60 m	75 m	100 m	60 m	100 m	60 m
HORIZONTAL INTERNA										
Altura	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m
Radio	2 000 m	2 500 m	3 000 m	4 000 m	5 500 m	6 500 m	8 000 m	9 500 m	11 000 m	13 000 m
APRONIMACIÓN INTERNA										
Anchura	-	-	-	-	-	-	-	90 m	120 m	120 m
Distancia desde el umbral	-	-	-	-	-	-	-	60 m	60 m	60 m
Longitud	-	-	-	-	-	-	-	900 m	600 m	600 m
Pendiente	-	-	-	-	-	-	-	2,1%	2%	2%
APRONIMACIÓN										
Longitud del borde interior	60 m	60 m	110 m	150 m	170 m	200 m	300 m	170 m	300 m	300 m
Distancia desde el umbral	10 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m
Diferencia (a cada lado)	10%	10%	10%	10%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Primera sección										
Longitud	1 600 m	2 100 m	3 000 m	3 000 m	2 500 m	2 000 m	3 000 m	3 000 m	1 500 m	1 500 m
Pendiente	5%	4%	3,31%	2,4%	3,31%	2%	2%	2,2%	2%	2%
Segunda sección										
Longitud	-	-	-	-	-	3 600 m ^b	3 600 m ^b	12 000 m	1 600 m ^b	1 600 m ^b
Pendiente	-	-	-	-	-	2,2%	2,2%	1%	2,2%	2,2%
Sección horizontal										
Longitud	-	-	-	-	-	2 400 m ^b	4 400 m ^b	-	5 400 m ^b	4 400 m ^b
Longitud total	-	-	-	-	-	12 000 m	12 000 m	12 000 m	12 000 m	12 000 m
DE TRANSICIÓN										
Pendiente	20%	20%	14,3%	14,3%	20%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
DE TRANSICIÓN INTERNA										
Pendiente	-	-	-	-	-	-	-	40%	33,3%	33,3%
SUPERFICIE DE ATERRIZAJE INTERMIDIO										
Longitud del borde interior	-	-	-	-	-	-	-	90 m	120 m	120 m
Distancia desde el umbral	-	-	-	-	-	-	-	60 m	60 m	60 m
Diferencia (a cada lado)	-	-	-	-	-	-	-	10%	10%	10%
Pendiente	-	-	-	-	-	-	-	2%	1,33%	1,33%

a. Salvo indicación contraria, todas las dimensiones se miden horizontalmente

b. Longitud variable

c. Distancia hasta el extremo de la franja

d. Distancia hasta el extremo, si esta distancia es menor que c.

FUENTE: Anexo 14, O.A.C.I., 1990

1.3 OPERACIÓN DE AERONAVES.

PROCEDIMIENTO DE SALIDA.

Los procedimientos de salida por instrumentos se diseñan por el personal de control aéreo, las recomendaciones y normatividad para sus diseños aparecen principalmente en los PANS-OPS que son la actualización del documento 8168, se publican en forma de rutas específicas que han de seguirse (siguiendo una derrota de ascenso) o de salidas omnidireccionales incluyendo las pendientes de diseño del procedimiento y la ubicación y detalles de los obstáculos. En caso de las salidas omnidireccionales deberán especificar los sectores de obstáculos que deben evitarse.

El procedimiento de salida por instrumentos estará restringido en general por la configuración del terreno que rodea el aeropuerto y los requisitos del control de tráfico aéreo (ATC). En el caso de rutas normalizadas de salidas por instrumentos, estos factores influirán también sobre el tipo y emplazamientos de las ayudas para la navegación en relación con la ruta de salida.

Como las restricciones del espacio aéreo también pueden afectar el trazado de las rutas y por lo tanto el emplazamiento de las ayudas para la navegación, será necesario verificar que los sitios donde los diseñadores de procedimientos supongan el emplazamiento de las ayudas a la navegación sean realmente adecuados para instalarlas o que se puedan habilitar.

En muchos aeropuertos no se requiere una ruta de salida prescrita por el (ATC), sin embargo, debido a los obstáculos cercanos al aeropuerto, puede ser necesario imponer restricciones a sectores determinados o

bien publicar una pendiente mayor de diseño que contenga al obstáculo para que los aviones lo superen.

En caso de que el avión en vuelo no pueda franquear los obstáculos con un margen adecuado, se fijarán mínimos de utilización del aeropuerto que permitan el vuelo visual sin obstáculos.

Siempre que sea posible se determinará una salida en línea recta alineada con el eje de la pista y solo se construirá una salida con viraje en caso de que el avión al despegar deba hacer un viraje de más de 15°. Debido a que a menor velocidad previa al viraje, éste se podrá realizar con menor radio de giro y por lo tanto con menos brusquedad. La O.A.C.I. recomienda que para salidas con viraje la velocidad que se especifique en el procedimiento no exceda a las siguientes:

CATEGORIA DEL AVIÓN	VELOCIDAD MÁXIMA Kmh (Nudos)
A	225 (120)
B	305 (165)
C	490 (265)
D	540 (290)
E	560 (300)

La tabla anterior aparece en los "Procedimientos para los servicios de navegación aérea", operación de aeronaves, vol. 1, doc. 8168 OPS/611, O.A.C.I.

Ahora bien, debido a la fuerza de sustentación requerida por los aviones durante el ascenso y considerando que en ese momento tienen su peso máximo, sería deseable por razones aerodinámicas que la salida se realice a la mayor velocidad que el avión pudiera desarrollar, pero finalmente la velocidad o rango de velocidades recomendadas para la salida será la calculada por el diseñador de procedimientos para cada avión y en caso de que alguno requiera

una velocidad superior deberá construirse un procedimiento de salida alternativo para ese avión.

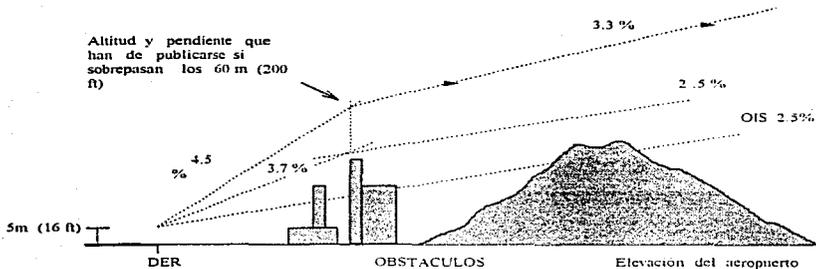
Es importante hacer notar que en caso de tener algún obstáculo de gran tamaño en la zona de salida de una pista, la disminución de las velocidades y la dificultad que pudieran tener los procedimientos provocarían además de mayor riesgo de accidentes, una mayor tardanza entre operaciones por lo tanto una disminución en la capacidad de la pista que se traduciría en futuros costos extra por espera y demoras en las operaciones. De modo que siempre será mejor orientar las pistas hacia zonas despejadas en las que puedan realizarse salidas directas que además ofrecen a los controladores aéreos y a los pilotos mayor sencillez en sus respectivas labores.

Los procedimientos de salida, se construyen para cada pista y en función de las diversas categorías de aviones que la utilizarán, tomando como base una pendiente de ascenso (PDG) de 3.3% con todos los motores funcionando o una (PDG) mayor si es necesaria para lograr el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos, este último variará para cada aeropuerto.

FRANQUEAMIENTO DE OBSTÁCULOS

La pendiente de diseño de procedimiento (PDG) recomendada por la O.A.C.I. es de 3.3% (doc. 8168), excepto en casos especiales, dicha pendiente se integra de la siguiente manera:

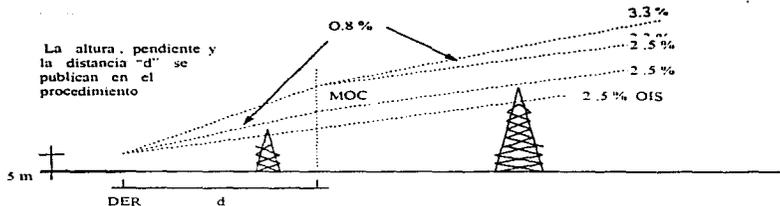
a) Una pendiente de 2.5% que es traza de un plano conocido como superficie de identificación de obstáculos (OIS) o bien una pendiente basada en el obstáculo más crítico que penetre dicha superficie, la mayor de ambas pendientes.



La gráfica anterior fue tomada de los PANS-OPS, doc 8168, O.A.C.I

b) Una pendiente adicional de 0.8% como margen de franqueamiento de obstáculos (MOC).

La pendiente de diseño de procedimiento que se publicará para el primer tramo cuando existe algún obstáculo cercano al extremo de pista (DER) que no sea superado por la (OIS), se integrará por la pendiente que se forma entre el punto de elevación del avión sobre el (DER) y el punto de altura máxima del obstáculo, más la pendiente adicional de 0.8% como margen de franqueamiento de obstáculos, la pendiente así formada que por lo tanto será mayor de 3.3% se mantendrá hasta garantizar el margen de franqueamiento de obstáculos para la fase de vuelo siguiente.



El esquema anterior muestra la integración de la pendiente para el primer tramo (PANS-OPS)

Con el esquema anterior puede explicarse mejor lo comentado al principio del capítulo referente a que a mayor altura de un obstáculo que se debe sobrevolar, la pendiente de ascenso después del despegue será mayor, por lo que se requerirá mayor potencia de empuje y por lo tanto se incrementan los riesgos, e inclusive, podríamos tener el caso de aviones cuyas masas no les permitirán adoptar esas pendientes y por lo tanto se tendría que buscar una solución mediante virajes o disminución de la carga de pago.

El margen mínimo de franqueamiento de obstáculos es cero en el extremo de salida de pista (DER) y aumenta después en 0.8% de la distancia horizontal en dirección del vuelo y suponiendo una divergencia máxima de 15°.

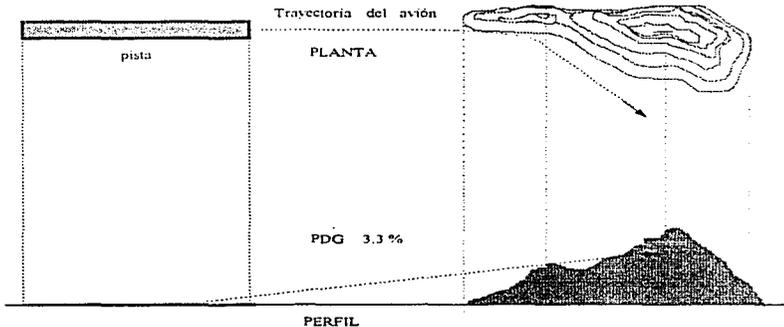
En caso de requerir un viraje, el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos, será de 90m (295 ft.). Solo en casos de terrenos montañosos adyacentes podría aumentarse el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos (PANS-OPS, Vol II, parte III).

RUTAS DE SALIDA POR INSTRUMENTOS.

El trazo de las rutas de salida por instrumentos y por tanto los criterios de franqueamiento de obstáculos estarán basados en la derrota que ha de seguir el avión, sin embargo, el piloto tiene la libertad de hacer pequeñas modificaciones a la ruta de salida teniendo en cuenta la variación de la dirección del viento con la finalidad de que mantenga el avión dentro del espacio aéreo protegido.

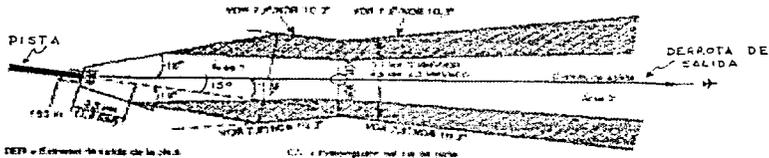
Las salidas pueden hacerse de dos maneras básicamente, en línea recta o con viraje. Para las salidas en línea recta, la ruta de salida seguirá la derrota después de 20 km (10.8 NM) desde el extremo de pista (DER), para las salidas que requieren viraje será hasta 10 km (5.4 NM) después de completar el viraje.

En caso de tener un obstáculo no superable debido a la imposibilidad de algún o algunos aviones de adoptar pendientes muy pronunciadas inmediatamente después del despegue, el diseñador de procedimientos tendría la opción de proponer un viraje gracias al cual el ascenso se pudiera hacer con una pendiente (PDG) normal de 3.3% y franquear el obstáculo.



SALIDAS EN LÍNEA RECTA.

Se considera salida en línea recta aquella que no diverge más de 15° de la alineación del eje de la pista, la guía de derrota que marcará la dirección de la salida se proporcionará mediante una instalación VOR o NDB. En caso de tener obstáculos en la salida, la pendiente de ascenso será mayor de 3.3 % hasta una altura en que se pueda franquear el obstáculo, no hay especificación para las pendientes máximas de ascenso en la primera etapa del despegue hasta una altura de 60m (200 ft) sobre la altura de referencia del aeropuerto en caso de tener obstáculos muy próximos.



SALIDAS CON VIRAJE.

Se considera una ruta con viraje cuando la derrota incluya un defasamiento horizontal de más de 15° respecto a la prolongación del eje de la pista, hasta alcanzar una altura de 120m (394 ft) sobre la elevación del extremo de pista (DER), será en un punto predeterminado y a dicha altura donde el avión efectuará el giro, en el caso de que una salida requiera hacer el viraje antes de alcanzar los 120m deberán prepararse procedimientos de salida especiales para ese sitio por parte del personal de control aéreo.

Las razones para incluir un viraje en una ruta son salvar un obstáculo situado en la salida en línea recta o algún cambio de dirección para iniciar el vuelo en ruta. Las velocidades para la salida con viraje son las finales que se utilizan en la aproximación frustrada pero aumentadas en 10% para considerar el aumento de masa del avión en el despegue, las velocidades máximas para salidas con viraje se han especificado en los PANS-OPS en función de la categoría del avión, la tabla con dichas velocidades aparece en la página 30.

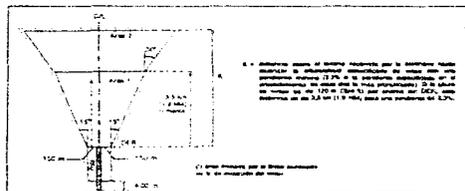
SALIDAS OMNIDIRECCIONALES.

Se denomina salida omnidireccional a aquellas salidas en las que no se especifica una guía de derrota, este procedimiento se inicia en el extremo de la pista (DER) y se construye considerando un viraje hipotético al alcanzar 120m (394 ft) de altura sobre la elevación del aeropuerto. El viraje no podrá iniciarse hasta alcanzar por lo menos 6000m horizontalmente a partir del inicio de la pista y tendrá un margen mínimo de franqueamiento de obstáculos de 90m (295 ft) antes de hacer virajes de más de 15°.

La salida omnidireccional se utiliza cuando se presenta una o más de las circunstancias siguientes:

PROCEDIMIENTO NORMAL:

Si no hay obstáculos dentro de la OIS (superficie de identificación de obstáculos) y hay un margen de franqueamiento de obstáculos de 90m (295 ft), entonces la pendiente de ascenso de 3.3% hasta la altura de 120 m (394 ft) será suficiente.



El esquema anterior fue tomado de los PANS-OPS, DOC 8168, VOL 2

ALTURA DE VIRAJE :

Si los obstáculos impiden el viraje en cualquier dirección al alcanzar los 120 m de altura, se especificará en el procedimiento continuar la pendiente de

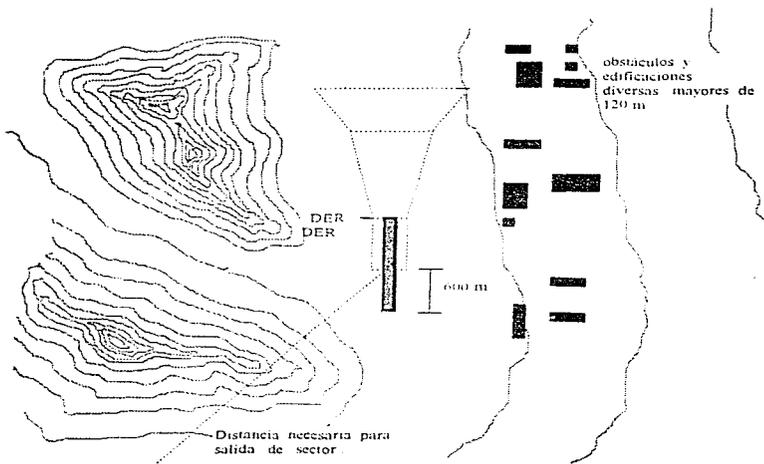
ascenso de 3.3 % hasta la altura en que pueda efectuarse el viraje.

PENDIENTE DE DISEÑO DE PROCEDIMIENTO ESPECIFICADA :

Cuando existen obstáculos adyacentes habrá que definir una pendiente de ascenso mínima superior a 3.3 % hasta la altura en que se pueda efectuar el viraje.

SALIDAS DE SECTOR :

En caso de haber múltiples obstáculos en la zona o sector de salida tendrá que formularse un procedimiento específico que puede incluir varios virajes y cambios de pendiente .



El diagrama anterior permite ver que en un caso dado y desde el punto de vista del diseño del procedimiento, sería preferible emplazar las pistas orientadas entre dos obstáculos (ej. cadenas montañosas) en la que se hiciera una salida de sector, que orientarla en dirección a un obstáculo y tener que efectuar un procedimiento de salida con múltiples virajes y cambios de pendiente, aunque claro esta que la mejor opción se lograría estudiando detalladamente el caso particular cuando se presentara.

PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS .

El proceso de aproximación por instrumentos tendrá que ser definido en función del tipo de terreno que rodea el aeropuerto, el tipo de operación que se realizará y del tipo de aviones que se operarán. Estos factores influirán de igual forma sobre el tipo y emplazamiento de las ayudas para la navegación.

La aproximación por instrumentos puede tener cinco etapas que son:

- Tramo de llegada
- Aproximación inicial
- Aproximación intermedia
- Aproximación final
- Aproximación frustrada

Cada tramo del procedimiento de aproximación comienza al terminar el anterior en puntos específicos, básicamente existen dos modos de aproximación que puede ser directa o en circuito.

Siempre que sea posible será mejor la aproximación directa alineada con el eje de la pista (ILS). Para el caso de aproximaciones que no son de precisión, se acepta una aproximación directa si el ángulo entre la derrota de aproximación final y el eje de la pista fuera de 30° o menos, es decir, que si el viraje necesario para alinearse a la pista es demasiado brusco deberá realizarse un circuito de aproximación.

La aproximación por circuito se hace en casos en los que por restricciones impuestas por el terreno adyacente (obstáculos) o por otras restricciones de control aéreo (Ej. circuito de espera) la alineación de la derrota de aproximación final o la pendiente de descenso quedará fuera del criterio de aproximación directa.

En ambos casos se establecen alturas mínimas de sector para cada aeropuerto, con un margen de franqueamiento de obstáculos de 300 m (984 ft) como mínimo dentro de las 46 km (25 NM) de la instalación de recalada correspondiente al procedimiento de aproximación.

Además del tipo de aproximación que se describa para un procedimiento, las características de cada avión influirán en su diseño, por lo tanto, para cada tipo de aviones, es necesario contar con una clasificación que nos permita distinguirlos, la cual se conoce como categoría del avión.

CATEGORIAS DE AERONAVES .

Las características y el comportamiento de diseño (performance) de las aeronaves influyen directamente en el espacio aéreo y en la visibilidad requerida por el piloto para realizar las maniobras de aproximación. El elemento más importante del comportamiento de todo avión es la velocidad, debido a su relación directa con

la fuerza de sustentación y por lo tanto, con su maniobrabilidad.

Se han establecido cinco categorías de aviones a base de un valor equivalente a 1.3 veces la velocidad de pérdida en la configuración de aterrizaje, con la masa de aterrizaje máxima, para poder contar con una norma que relacione la maniobrabilidad del avión con los procedimientos de aproximación por instrumentos. (PANS-OPS, DOC. 8168, O.A.C.I.).

Categoría A: Menos de 169 km/h (91 NM/h) IAS

Categoría B: 169 - 223 km/h (91 - 120 NM/h) IAS

Categoría C: 224 - 260 km/h (121 - 140 NM/h) IAS

Categoría D: 261 - 306 km/h (141 - 165 NM/h) IAS

Categoría E: 307 - 390 km/h (166 - 210 NM/h) IAS

Nota: Las velocidades que aparecen en la pag. son mayores a las anteriores debido a que son necesarias para lograr el ascenso, mientras que la categoría se basa arbitrariamente en 1.3 veces la velocidad de pérdida según se explicó arriba.

Habiendo descrito las operaciones que los aviones deberán realizar y la clasificación que los distingue en base a sus características funcionales, se expondrá a continuación como se definen las dimensiones del canal libre en el espacio aéreo mediante la determinación de alturas de franqueamiento de obstáculos y anchos de seguridad.

ALTURA DE FRANQUEAMIENTO DE OBSTÁCULOS (OCA/H).

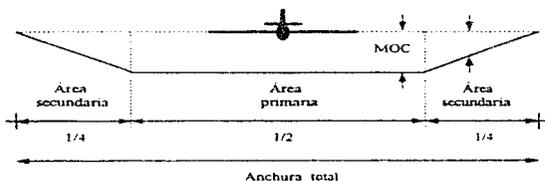
La altura de franqueamiento de obstáculos se calcula para cada procedimiento que a su vez fue hecho para cada categoría de avión ya sea en el caso de aproximación por instrumentos o en la aproximación en circuito. Puede ser la altura más baja prescrita en el procedimiento (OCA) o la altura más baja por encima de la elevación del umbral de la pista (OCH). A dicha altura

deberá comenzar la maniobra de aproximación frustrada en caso de ser necesario.

Los procedimientos de aproximación están definidos por áreas de aproximación que el piloto identifica gracias a las radioayudas instaladas cerca del aeropuerto.

El área de aproximación por instrumentos es en realidad un canal de acceso imaginario y libre de obstáculos a lo largo de la guía de derrota del procedimiento en cada uno de los cinco tramos de llegada, aproximación inicial, intermedia, final y frustrada. La sección de dicho canal perpendicular a la guía de derrota se descompone en un área primaria rectangular y dos áreas secundarias triangulares en los extremos según se muestra en la sig. figura. En caso de que el procedimiento no proporcione derrota durante un viraje, el área primaria comprenderá el ancho total del canal. (PANS-OPS, VOL .1, O.A.C.I.)

Trayectoria de vuelo considerada como la más baja.



A continuación aparecen dos tablas que contienen las velocidades de cálculo para los procedimientos de aproximación. De acuerdo con las categorías, podemos ver que a mayor tamaño y masa del avión, su velocidad de aproximación debe ser mayor debido a razones aerodinámicas, ya que la velocidad debe ser tal que

la fuerza de sustentación soporte el peso del avión hasta el contacto con la pista, lo que traerá como consecuencia la necesidad de mayores longitudes de pista para lograr el enfrenamiento de los aviones más grandes y pesados. (la longitud requerida de pista se tratará en el capítulo 3)

Categoría de la aeronave	V_{st}	Gama de velocidades para aproximación inicial	Gama de velocidades para aproximación final	Velocidades máximas para maniobrar en condiciones de vuelo visual (en circuito)	Velocidades máximas para aproximación finalizada	
					Intermedia	Final
A	<169	165/280(205*)	130/185	185	185	205
B	169/223	220/335(260*)	155/240	250	240	280
C	224/260	295/445	215/295	335	295	445
D	261/306	345/465	240/345	380	345	490
E	307/390	345/467	285/425	445	425	510

V_{st} — Velocidad en el umbral a base de un valor de 1.3 veces la velocidad de pérdida en la configuración de aterrizaje con la masa de aterrizaje máxima certificada.

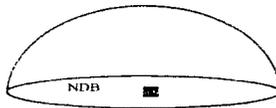
* Velocidad máxima para los procedimientos de inversión y de circuito de hipódromo.

Nota. — Las velocidades V_{st} indicadas en la columna 1 de la Tabla III-1-1 se han convertido exactamente a partir de las velocidades indicadas en la Tabla III-1-2, puesto que determinan la categoría de la aeronave. Las velocidades indicadas en las columnas restantes se convierten y redondean al múltiplo más próximo de cinco por razones operacionales, y desde el punto de vista de la seguridad de las operaciones, esas velocidades se considerarán equivalentes.

Las tablas anteriores se tomaron de los PANS-OPS, doc. 816R, vol 2, O.A.C.I.

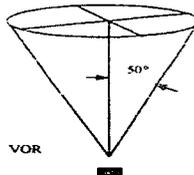
Los puntos de referencia antes mencionados que indican la guía de derrota del procedimiento, son señalados gracias a las radioayudas o equipos electrónicos de balizamiento que son:

NDB : Faro no direccional (non directional beacon), es una instalación en tierra que emite señales de radio entre los 200 - 1750 Khz . su alcance esta definido por una media esfera de la cual el NDB es el centro, puede balizarse toda una ruta con instalaciones NDB, su unico inconveniente es que la señal que emite puede ser reflejada por las zonas de ionización en caso de tormentas . A continuación aparece un esquema que muestra el área de tolerancia del punto de referencia por encima de un NDB .



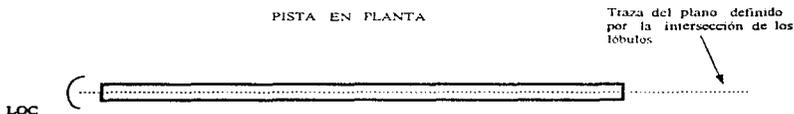
ADF : Es el instrumento complementario del NDB , ya que recibe la señal que este emite y forma parte de los instrumentos de navegación del avión .

VOR : Faro omnidireccional de alta frecuencia (Very High Omnidirectional Radio), su ventaja sobre el NDB es que debido a su alta frecuencia VHF de 112 - 117.95 Mhz , su señal no sufre reflexión o desvío debido a la ionización, este radiofaro emite su señal en forma cónica y tiene alcance óptico, a continuación aparece un esquema del área de tolerancia por encima de un VOR . (PANS-OPS)



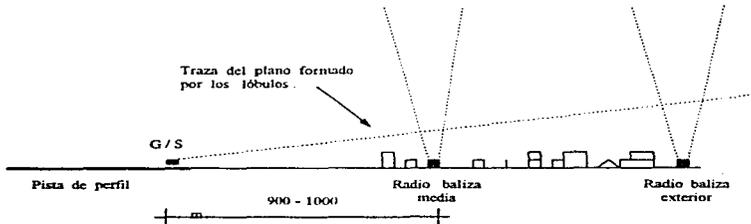
ILS : Son las siglas del sistema de aterrizaje por instrumentos (Instrument Landing System), este sistema consta básicamente de dos emisores de ondas de radio , uno de ellos llamado localizador "LOC" que opera en frecuencias VHF entre 108 - 112 Mhz y el otro llamado GLIDE/SLOPE que opera en frecuencias UHF entre los 328.6 - 335.4 Mhz . El LOC esta instalado en tierra al final de la pista , emite dos señales en forma de lóbulos que al intersectarse forman el plano vertical que contiene al eje de la pista. Su finalidad es que al ser detectado por los instrumentos del avión , el piloto pueda intersectarlo , lo que asegurará que esté alineado hacia el eje de la pista .

PISTA EN PLANTA



El GLIDE/SLOP es otra instalación de tierra que emite también dos señales en forma de lóbulos una arriba de otra que forman un plano horizontal al intersectarse , con el cual se indica al avión la pendiente de descenso adecuada .

De esta manera el sistema genera dos planos cuya intersección constituye la trayectoria óptima de descenso .



Adicionalmente el sistema utiliza radiobalizas " z " conocidas como " marcadores " instaladas en tierra y cuya función es definir las distancias al umbral de la pista .

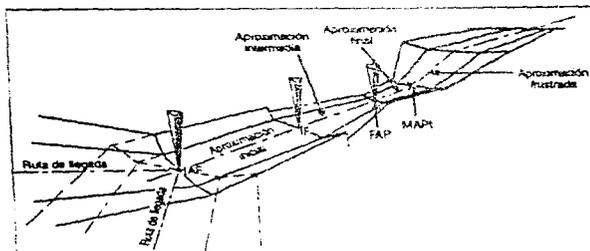
Una vez localizado un sitio para el emplazamiento de pistas que cumpla al menos en su mayoría con los espacios aéreos del " anexo 14 " y para el cual sea posible la construcción de procedimientos seguros para las operaciones de los aviones que utilizarán el aeropuerto , la única condición adicional que deberá cumplir dicho sitio para que desde el punto de vista de factibilidad y seguridad de las operaciones sea calificado como adecuado para emplazar el aeropuerto , será contar con un régimen de vientos con dirección y velocidades que permitan el funcionamiento de los aviones .

El procedimiento para elegir el sitio idóneo en realidad se hará seleccionando lugares probables por su topografía , cercanía con el lugar que demanda el aeropuerto , vías de acceso , comunicaciones y servicios en general que harán el proyecto más económico . Después se procederá a hacer un estudio de vientos para saber si son posibles las operaciones en ese sitio y en caso de serlo , sus resultados nos obligarán a orientar la pista en alguna dirección .

Una vez ya orientada la pista se procedería a revisar si se cumple o no con los espacios aéreos del " anexo 14 " y a diseñar los procedimientos para las operaciones de aproximación y salida para todos los aviones que utilizarán el aeropuerto (previendo incluso los aviones futuros) . Si los diseños de procedimientos muestran que es posible la operación en el aeropuerto entonces se aceptará definitivamente el sitio y se continuará con el resto del proyecto aeroportuario .

A continuación se describirán detalladamente las etapas de aproximación que se mencionaron anteriormente con la finalidad de comprender mejor dicho procedimiento .

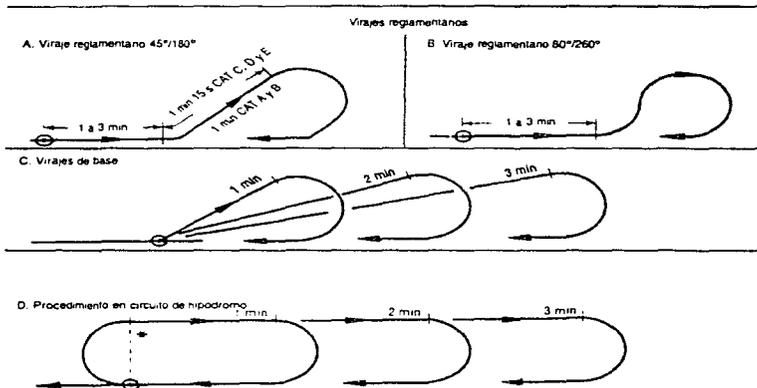
Como ya mencionamos la ruta de aproximación esta contenida en un canal imaginario de espacio libre de obstáculos, el eje longitudinal de dicho canal estará marcado por las radiobalizas NDB, "Z" o VOR en las proximidades del aeropuerto, describiendo la ruta de aproximación, por lo tanto el canal comienza después de la fase "en ruta" del vuelo donde inicia un tramo llamado "ruta de llegada" que continuara hasta el punto IAF marcado por una radiobaliza NDB, las transiciones de las siguientes etapas de aproximación, que son: inicial, media y final, pueden estar marcadas por radiobalizas ILS como se muestra en la siguiente figura:



TRAMOS DE UNA APROXIMACIÓN DIRECTA POR INSTRUMENTOS.

El tramo de aproximación inicial comienza en el punto de referencia IAF y termina en el punto de referencia de aproximación intermedia IF, durante la aproximación inicial el avión ya se ha apartado del vuelo en ruta, la velocidad del avión dependerá de la distancia al aeropuerto y del descenso requerido, la altura mínima de franqueamiento de obstáculos en este tramo para el área primaria de la sección del canal de entrada será de 300 m (984 ft), cuando no se disponga de un punto de referencia de aproximación inicial o intermedia adecuado para llevar a cabo el procedimiento de aproximación directa como se indicó en el esquema anterior, se requerirá de un proceso de inversión ó de un circuito de espera, los cuales se ilustran a continuación.

Procedimientos de Inversión:



Los esquemas anteriores fueron tomados de los PANS-OPS, vol.1, O.A.C.I.

Durante el tramo de aproximación intermedia deben ajustarse la velocidad y configuración del avión con el fin de lograr un mejor alineamiento para la aproximación final, por esta razón la pendiente durante el tramo es poco pronunciada, el margen de franqueamiento de obstáculos se reduce de 300 m (984 ft) a 150 m (492 ft) en el área primaria de la sección del canal.

En el tramo de aproximación final se realizan ajustes a la alineación con el eje de la pista en caso de un aterrizaje directo (o hacia el aeropuerto en caso de una aproximación visual) y

el descenso para aterrizaje. Esta última etapa comienza en la radiobaliza interior FAP que es un punto contenido en el plano cuya traza es el eje de la pista y que es generado por el LOC. La altura de dicho punto intersecta a la trayectoria nominal de planeo, por tanto se encontrará a alturas que van de 300 - 900 m (984 - 2955 ft) por encima de la elevación de la pista, finalmente ya alineado el avión al eje de la pista y descendiendo mediante la señal del G/S con la pendiente adecuada se llevará acabo el aterrizaje.

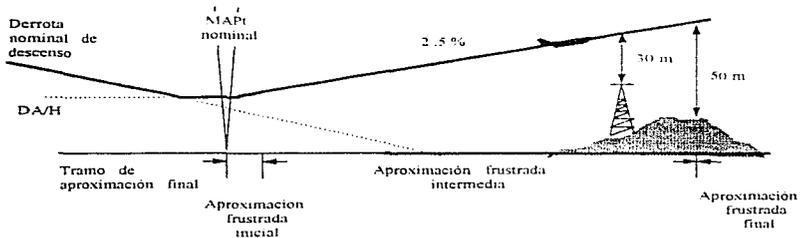
APROXIMACIÓN FRUSTRADA.

Quando por razones de poca visibilidad, errores de control, falla de instrumentos o algún otro percance el piloto debe abortar el aterrizaje y volver a elevarse, debe realizar el procedimiento conocido como aproximación frustrada, que consiste en una fase inicial, una intermedia y una final, durante las cuales tendrá que cambiar la altitud y dirección del avión. Existen también superficies limitadoras de obstáculos que contempla el "anexo 14" como continuación del canal de aproximación e incluso fuera del aeropuerto, su forma y dimensiones se vieron en el subtema 2.1.

Al igual que los procedimientos de salida y aproximación, el procedimiento de aproximación frustrada se calculará para cada tipo de avión y básicamente consiste en que el piloto al llegar a la altura de decisión (DA/H), decida si continuará el aterrizaje o se elevará, en caso de tener que elevarse recuperará la horizontalidad del avión a esa altura DA/H y la mantendrá hasta pasar arriba del radiofaro VOR adyacente a la pista. El punto definido por la intersección de la trayectoria del avión a dicha altura con el plano perpendicular a la pista que contiene al VOR, se conoce como punto de aproximación frustrada (MApt) y en este punto el avión tomará una pendiente ascendente y volverá a elevarse. A continuación aparece un esquema que muestra en planta y en elevación el procedimiento

de aproximación frustrada realizado después de un viraje reglamentario tipo "A" como el que aparece en la fig. anterior, podemos también apreciar la importancia y ubicación del VOR adyacente a la pista sobre el cual se ubicará el punto de ascenso para la aproximación frustrada MAPt, así como la importancia del punto de referencia de escalón de descenso.

Otra forma de definir el MAPt es mediante un punto de referencia arbitrario, alguna distancia especificada a partir del punto de referencia de aproximación final FAF o por la intersección de la trayectoria de planeo electrónica del avión con la altura DA/H del procedimiento como se muestra en la siguiente figura, en cualquier forma el principio es el mismo y el MAPt será especificado por los diseñadores de procedimientos según convenga para cada caso en particular.



FASES DE APROXIMACIÓN FRUSTRADA

La fase inicial de la aproximación frustrada empieza en el punto MAPt y termina en el punto en el que se establece el ascenso, durante esta fase se necesitará de la máxima concentración y pericia del piloto para establecer la pendiente de ascenso y llevar a cabo

las variaciones de la configuración del avión , debido a lo cual , no puede utilizarse el equipo de guía durante dicha maniobra y por lo tanto no habrá virajes .

La fase intermedia inicia al establecerse el ascenso , continuará en línea recta y se extenderá hasta alcanzar un margen de franqueamiento de obstáculos de 50 m (164 ft). La derrota en esta fase puede modificarse en 15 grados a partir de la derrota de la fase inicial .

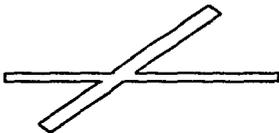
La fase final comenzará al alcanzar la altura de franqueamiento de obstáculos de 50 m y se extiende hasta el punto donde se inicia la nueva aproximación , un procedimiento de espera o el regreso al vuelo en ruta , por lo que habrá virajes en esta última fase .

El documento 8168 prevé además del canal de seguridad , un espacio protegido alrededor de las pistas para proteger las maniobras en circuito y de aproximación visual .

Las maniobras de aproximación visual comienzan al terminar la aproximación por instrumentos o desde el circuito para el caso de las aproximaciones en condiciones visuales VFR , consisten en rodear el aeropuerto para que el avión adopte la posición óptima para el aterrizaje en una pista que no se encuentra convenientemente ubicada para la aproximación directa . El área requerida por dicha superficie se determina trazando arcos con centro en el umbral de cada pista del aeropuerto y uniendo (en su caso) dichos arcos mediante tangentes . Los radios para el trazo de los arcos , están en función de :

1. Categoría del avión .
2. Velocidad de aproximación indicada para dicha categoría.
3. Velocidad del viento 46 km/h (25 kt) a lo largo del viraje .
4. Ángulo de inclinación lateral, será de 20 grados como promedio ó de 3 grados/s. Se escogerá la que requiera menor inclinación.

Área de maniobra de aproximación visual en circuito



El radio (R) varía según la categoría del avión, en la página siguiente aparecen ejemplos de cálculo de "R", PANS-OPS, vol. 2

A continuación se muestra un ejemplo para determinar los radios para el área de maniobra de aproximación visual [en circuito] para un aeródromo situado a 600 m [unidades SI].

<i>Categoría de aeronaves/TAS (km/h)</i>	<i>A/185</i>	<i>B/250</i>	<i>C/315</i>	<i>D/380</i>	<i>E/445</i>
TAS a 600 m MSL + 46 km/h factor viento (km/h)	241	310	404	448	516
Radio (r) de viraje (km)	1.28	2.08	3.46	4.34	5.76
Tramo directo (km)	0.56	0.74	0.93	1.11	1.30
Radio (R) a partir del umbral (km)	3.12	4.90	7.85	9.79	12.82

En caso de que exista un gran obstáculo en un sector del área de maniobra de aproximación visual en circuito, fuera del área de aproximación final y de aproximación frustrada, no se hará el trazo del área de maniobra según se indicó anteriormente, ya que dicho obstáculo estará limitado por las superficies de aproximación por instrumentos que aparecen en el "anexo 14, cap. 4" y por tanto, el circuito se diseñará de manera que no pase por dicho sector.

Una vez establecida el área de maniobra de la aproximación visual en circuito, se determina la altura de franqueamiento de obstáculos OCA/H para cada categoría de avión proporcionando así el margen de franqueamiento de obstáculos MOC.

<i>Categoría de aeronave</i>	<i>Margen de franqueamiento de obstáculos m (ft)</i>	<i>OCH mínima sobre la elevación del aeródromo m (ft)</i>	<i>Visibilidad mínima km (NM)</i>
A	90 (295)	120 (394)	1.9 (1.0)
B	90 (295)	150 (492)	2.8 (1.5)
C	120 (394)	180 (591)	3.7 (2.0)
D	120 (394)	210 (689)	4.6 (2.5)
E	150 (492)	240 (787)	6.5 (3.5)

Por razones de operación puede agregarse un margen de seguridad a la OCA/H llamado "altura mínima de descenso" DA/H. El piloto no deberá descender de esta altura a menos que:

1. Haya establecido y pueda mantener la referencia visual.
2. Tenga a la vista el umbral de la pista.
3. Pueda mantener el franqueamiento de obstáculos requerido, y el avión se encuentre en posición de llevar a cabo el aterrizaje.

Debido a que la aproximación en circuito es una maniobra básicamente visual y por lo tanto depende además de las condiciones meteorológicas, de la visibilidad, y de la pericia y decisión del piloto, es imposible establecer un procedimiento único para aproximación en circuito en todas las posibles situaciones, sin embargo, la hipótesis es que el umbral de la pista y las señales para identificar la pista se mantengan a la vista mientras se está en la altura MDA/H para vuelo en circuito. Aún así, la aproximación circulando no se autoriza de noche.

En el caso de que el piloto pierda la referencia visual cuando vuela en circuito en una aproximación por instrumentos deberá seguir la aproximación frustrada .

En los aeropuertos donde las características topográficas lo permitan y siempre que sea conveniente desde el punto de vista de las operaciones , puede prescribirse una derrota específica para las maniobras visuales además del área del circuito , habrá entonces derrotas para cada categoría de avión y se tendrán las siguientes consideraciones :

a) Ya que la navegación se efectúa por referencia visual , cualquier información de navegación que sea recibida por radio tendrá solo carácter de asesoramiento .

b) Al igual que la maniobra de aproximación frustrada , para la aproximación por instrumentos antes vista , en el caso de maniobra visual con derrota prescrita puede abortarse el aterrizaje mediante la maniobra conocida como " motor y al aire " para después alcanzar una altura segura (al ingresar al tramo a favor del viento del procedimiento de derrota prescrita o a la trayectoria de aproximación frustrada por instrumentos)

c) Dado que las maniobras tienen referencia visual con una derrota prescrita , será preferible que la tripulación de vuelo esté familiarizada con el terreno y que las condiciones meteorológicas sean más favorables que los mínimos de utilización del aeropuerto prescritos para este procedimiento .

La derrota prescrita definirá el sentido y la longitud de cada tramo, la longitud del tramo final se calcula para permitir 30 seg. de vuelo antes de llegar al umbral (a las velocidades que se indican en las tablas anteriores). Si se especifica una altura mínima al comienzo del tramo, debe modificarse la longitud del tramo final teniendo en cuenta una pendiente máxima de descenso de 10 % (la pendiente óptima de descenso es de 5%).

Existe un área libre de obstáculos a lo largo de la derrota prescrita que define un corredor de ancho constante centrado en dicha derrota, este corredor inicia en el "punto de divergencia" y comprende incluso la zona para realizar la maniobra "motor y al aire" con intención de realizar una segunda maniobra de aproximación visual, este procedimiento se ilustra a continuación.

SEMIANCHURA DEL CORREDOR.

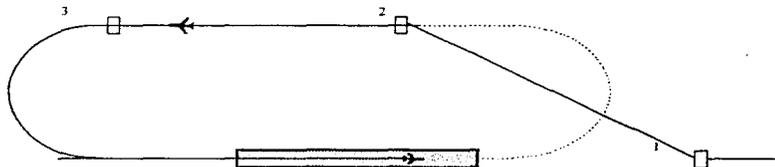
Categoría del avión	A	B	C	D	E
Semianchura del corredor (1)					
metros	1400	1500	1800	2100	2600
pies	4593	4921	5905	6890	8530

Los datos de la tabla anterior fueron tomados del doc PANS-OPS, vol. 2, o.a.c.i. En la página siguiente aparecen dibujos que ilustran el caso general de la derrota normalizada y el área definida por el ancho del corredor antes mencionado.

Derrota normalizada (caso general).

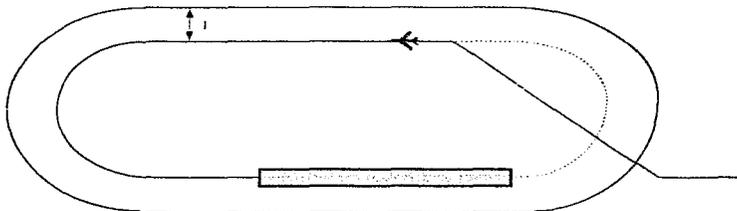
Característica topográfica (se publicará en la carta) 

Derrota de ascenso



1. Punto de divergencia
2. Comienzo del tramo a favor del viento
3. Comienzo del último viraje.

Área.



Los elementos que hemos tratado hasta aquí, referentes a la operación de aeronaves, son suficientes para el entendimiento básico de las maniobras de entrada y salida desde el punto de vista de las necesidades aerodinámicas y como influyen en los procedimientos que los aviones deben realizar, además se

mencionan algunas de las recomendaciones de la O.A.C.I. para tener una idea de las necesidades de los diseñadores de procedimientos y las restricciones que se les impone a sus diseños. Conciente de lo anterior el diseñador del aeropuerto o de alguna ampliación de éste, estará en condiciones de realizar un diseño congruente con las necesidades de las operaciones aéreas así como de poder trabajar en cooperación con los diseñadores de procedimientos para optimizar ambos diseños (el del aeropuerto en conjunto y el de procedimientos) en base a las restricciones y necesidades de ambos , para lograr una mayor seguridad y funcionalidad del futuro aeropuerto .

El siguiente capítulo esta dedicado al diseño de las pistas, que es la parte del diseño total que más afectará al diseño de los procedimientos . De hecho el proceso será ubicar las pistas y definir sus longitudes según se verá , para que en base a su ubicación se revise si cumple con las superficies del anexo 14 y se diseñen todos los procedimientos que sean necesarios para la operación de los diferentes aviones que servirá . Solo así , podremos saber si la pista será en realidad adecuada o no para las operaciones , y en caso de no serlo aún habiendo diseñado todos los posibles procedimientos para los aviones , será preferible abandonar un sitio y buscar otro para emplazar el aeropuerto , que construir o ampliar una pista o un aeropuerto en un lugar donde algún o algunos aviones simplemente no puedan operar .



En la foto superior puede apreciarse la antena LOC del sistema R.S del aeropuerto internacional " Benito Juárez " de la Cd de México

CAPÍTULO 2. PISTAS.

2.1 NÚMERO Y ORIENTACIÓN.

El emplazamiento de las pistas dependerá importantemente de los espacios aéreos libres adyacentes al aeropuerto. Ya que aún cuando las condiciones topográficas y meteorológicas hagan un sitio aceptable, este deberá cumplir con los espacios aéreos libres que a mayor número de pistas abarcarán zonas más extensas y posibilitar los procedimientos de las operaciones aéreas.

La elección del sitio para el emplazamiento de las pistas, su orientación y la determinación de sus dimensiones es quizás la fase más importante del diseño de la zona aeronáutica y del aeropuerto en su conjunto, debido a que una vez fijada la posición de la pista los demás elementos estarán en función de sus características. De manera que al determinar (al menos en parte) las ubicaciones y dimensiones de éstas, y teniendo en cuenta las restricciones de superficie de terreno del aeropuerto y topografía del lugar, la configuración general del aeropuerto estará prácticamente definida. Sin embargo, deberá buscarse aún dentro de la configuración general la mejor disposición de las instalaciones.

Los principales factores que influyen en el emplazamiento y orientación de las pistas son:

1. Las condiciones meteorológicas que se reflejan en el coeficiente de utilización del aeropuerto. Este coeficiente se determina por la distribución de los vientos y por la existencia de nieblas localizadas, por lo que será la base para la orientación de la pista.
2. La topografía del terreno del aeropuerto y de las zonas adyacentes determina los obstáculos de la

zona y el desnivel entre los extremos de la pista que puede incrementar importantemente su longitud y por lo tanto su costo.

3. El tipo, volumen y frecuencia del tránsito aéreo que se espera servir, creará las necesidades de capacidad en base a las cuales se determinará el número y tipo de pistas que satisfagan la demanda de manera más eficiente y económica.

4. Las características físicas y funcionales de los aviones determinarán la longitud y ancho de la pista así como la resistencia del pavimento.

5. Los efectos producidos al medio ambiente (principalmente ruido)

De lo anterior se deduce que un buen diseño de pistas solo podrá lograrse al alcanzar un equilibrio entre los factores anteriores, es decir, determinar el número y características de las pistas de acuerdo a nuestra demanda, para no caer, por ejemplo, en el error de construir pistas de gran longitud, de las cuales una se utilice por aviones de medio y largo alcance y otra solamente para la aviación general, lo que representaría un desperdicio de recursos.

Otro ejemplo de necesidad de balance entre los factores mencionados es el requerimiento de mayores resistencias de pavimento al proyectar pistas de mayor longitud, pues de nada serviría una pista muy larga si los aviones de gran masa no pudieran aterrizar por falta de resistencia del pavimento o sufrirían daños estructurales debido a las deformaciones del mismo. En el caso de pistas cortas con pavimentos de alta resistencia no tendríamos problemas para la navegación pero si un gasto inútil.

Lo importante es que cada elemento del diseño de las pistas concuerde con los demás elementos y sus respectivas restricciones, y que a su vez el proyecto de pistas este de acuerdo a las necesidades y limitaciones del aeropuerto en conjunto. Aún en un proyecto de ampliación de pistas deberán revisarse y

modificarse si es necesario los diferentes elementos de la pista y prevenir el impacto de la ampliación en el resto de las instalaciones.

Hasta donde sea posible según las condiciones de cada caso particular, la pista debe estar orientada en la dirección del viento dominante. Es posible que en algún sitio exista más de una orientación favorable, de modo que la elección podría depender de otros factores como procedimientos de vuelo más sencillos, mejor distribución de las instalaciones aeroportuarias, aprovechamiento de suelo con mayor capacidad de carga etc.

Otro aspecto que influye en el diseño de la pista, es el ruido producido por los motores de los aviones, ya que causa malestar entre la población de las zonas cercanas al aeropuerto pudiendo ocasionar protestas generalizadas que resultaran en peticiones de reducción de ruido por parte del gobierno local. Lo que podría incluso obligarnos a modificar la configuración o el funcionamiento de las pistas en el futuro. Por lo tanto, para evitar modificaciones y gastos infructuosos deberá tenerse en cuenta el nivel de ruido permitido por los reglamentos locales (si existen) o cuidar de que los niveles de ruido permanezcan dentro de lo aceptable.

Los procedimientos para medición y evaluación del ruido pueden consultarse en Manual de planificación de aeropuertos, parte 2, doc 9184 y Anexo 16 de la OACI.

La intensidad de ruido deberá reducirse al máximo en cada caso particular, considerando que para el ser humano el umbral de audición se tiene a cero decibelios (dB) y el umbral de dolor a 140 dB. Teniendo en cuenta que cada aumento de 10 dB equivale a duplicar la intensidad aparente de un sonido.

La evolución tecnológica de los aviones a reacción ha permitido la disminución del ruido que producen, el cual se debe al funcionamiento propio de los motores y al llamado "auto-ruido", que es producto de la fricción del aire contra la estructura del avión. Sin embargo, a pesar de los logros actuales en la disminución del ruido de los motores, éste sigue siendo el principal componente del

ruido total, y el ruido producido por un avión comercial de reacción, varía alrededor de los 130 db si se esta a 80m del mismo antes de que inicie su recorrido de despegue ("Ruido y estampido sónico", Martín Cuesta Alvarez, ed. Paraninfo).

Por lo que actualmente, la responsabilidad de aminorar los efectos del ruido corresponde al proyectista del aeropuerto.

Ya que la intensidad del ruido disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia entre la fuente emisora y el receptor, se tiene que una de las formas más efectivas de reducir el ruido en las comunidades vecinas a los aeropuertos que estan totalmente rodeados por el desarrollo urbano, es la reducción de la longitud útil de pista mediante el desplazamiento de umbrales o cabeceras, el desplazamiento de calles de rodaje, de posiciones de estacionamiento o cualquier otra modificación para que los movimientos de los aviones se realicen lo más alejado posible de las zonas habitadas. Sin embargo, la longitud de pista dependerá de las características operacionales de los aviones y de las condiciones del lugar, por lo que no podemos alterar la longitud requerida de pista en un diseño por aminorar el ruido. La solución entonces, será prever hasta donde sea posible áreas pertenecientes al aeropuerto adicionales a las longitudes de pista y calles de rodaje.

Por otro lado, el desarrollo de la aviación comercial tiende hacia la separación entre aeropuertos de largo y mediano alcance con pistas STOL y V/STOL, es decir, de aterrizaje y despegue cortos o verticales, para los que la intensidad del ruido será bastante menor, tanto por la diferencia entre sistemas de propulsión de los aviones como por la menor longitud de sus pistas. Con la ventaja adicional de que reducir la longitud de sus pistas, probablemente no afecte tanto a sus operaciones, sin embargo, todo aeropuerto internacional seguirá operando aviones de grandes dimensiones y requiriendo pistas de grandes longitudes, por lo que el ruido continuará siendo un

factor importante en los nuevos diseños y ampliaciones durante su vida útil.

A continuación aparece una tabla que muestra la relación entre la tecnología aeronáutica que determinará la longitud de pista y el nivel de ruido.

Tecnología	Nivel de ruido (Km)	
	90PNdB	80PNdB
1960 largo alcance LTOL	180	450
1970 corto alcance STOL	60	250
1970 corto alcance STOL+motores atenuados a 10PNdB	5	20
Futuros RTOL con motores atenuados a 10PNdB	3	10
Futuros STOL	1	3

LTOL (para aterrizaje y despegue largo)

STOL (para aterrizaje y despegue corto)

RTOL (para aterrizaje y despegue reducido)

PNdB: Ruido percibido en dB

(Ruido y estampido sónico, Martín Cuesta Alvarez, cap. 2)

Por otra parte tenemos que la intensidad del ruido es mayor durante las aproximaciones que en el despegue, debido a que durante la aproximación la altura de emisión es mayor, y por lo tanto, las vibraciones del ruido afectan un área mayor sin ser atenuadas por obstáculos, mientras que durante el recorrido de despegue el ruido es atenuado por la rugosidad del suelo adyacente a la pista y por obstáculos como hangares, barreras contra chorro y paredes y edificios del aeropuerto. De manera que si la dirección de los vientos y los obstáculos orográficos lo permiten, será preferible orientar la pista de modo que sus cabeceras queden más alejadas de la zona urbana, y que la zona

de hangares y/o edificio terminal se interponga entre la pista y la zonas habitadas.

También deberá tenerse en cuenta el tipo de operaciones a realizar cuando se elige el emplazamiento de una nueva pista, ya que en el caso de vuelo por instrumentos deberán identificarse previamente las áreas sobre las cuales deben volar los aviones cuando sigan procedimientos de aproximación y de aproximación frustrada. Con la finalidad de asegurarse que la presencia de obstáculos en el área no restrinja la operación de los aviones, para lo cual, será indispensable contar ya, con los diseños de procedimientos de vuelo que se mencionaron en el capítulo anterior.

En cuanto a la influencia del viento, es recomendable que el coeficiente de utilización por minutos de la pista, no sea menor del 95% (la obtención del coeficiente se ejemplifica más adelante). A continuación se muestra como el número y el arreglo de las pistas influye directamente en su capacidad, y por lo tanto, en la del aeropuerto en conjunto.

INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN.

La configuración de un aeropuerto se define por el número y orientación de sus pistas así como por la ubicación del edificio de pasajeros. Teniendo ubicados estos últimos, las demás instalaciones, se proyectarán de manera que interfuncionen lo más óptimo posible.

Tanto las pistas como las calles de rodaje, deben cubrir los siguientes aspectos funcionales:

a.) Deben proporcionar una separación adecuada para las maniobras del tráfico aéreo.

b.) Deben causar la menor demora posible en los aterrizajes, los rodajes, y las operaciones de despegue.

c.) Deben proporcionar el menor recorrido posible desde y hacia las plataformas.

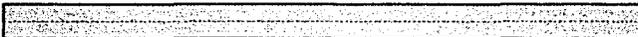
d.) Las pistas deben tener salidas y calles de rodaje adyacentes, de manera que el avión que aterrice pueda abandonarlas tan rápido como sea posible, y pueda recorrer el trayecto hasta la plataforma en el menor tiempo.

En los aeropuertos que manejarán un gran volumen de tráfico, es recomendable proyectar zonas de espera aledañas a las cabeceras de pista, de modo que puedan acomodarse en ellas tres o cuatro aviones de los de mayor tamaño previsto, e incluso con espacio suficiente para que un avión pueda adelantar a otro. Lo que dará mayores opciones a los controladores de vuelo para agilizar el tránsito tanto en pistas como rodajes. Por lo que la disposición geométrica de pistas es un factor que afecta directamente su capacidad para manejar operaciones en un determinado lapso de tiempo.

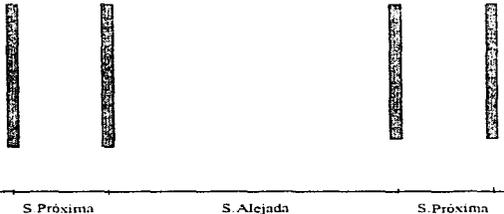
Actualmente existen muchas configuraciones de pistas, pero la mayor parte son combinaciones de las geometrías clásicas que son:

- 1. Pista única.**
- 2. Pistas paralelas.**
- 3. Pistas que se cortan.**
- 4. Pistas en V.**

1. La pista única es la configuración más simple, se ha estimado que su capacidad horaria en condiciones de vuelo visual (VFR) se encuentra entre las 45 y 100 operaciones por hora, mientras que en condiciones de vuelo instrumental (IFR) la capacidad se reduce a un rango entre las 40 y 50 operaciones por hora.



2. En las pistas paralelas la eficiencia depende del número de pistas y la separación entre ellas, debido a que a mayor separación serán más independientes entre sí, y por lo tanto, se tendrá la eficiencia de "pista única" en cada una. La capacidad necesaria se dará mediante el número de pistas. Este tipo de pistas requieren para su construcción grandes áreas y que el lugar genere la demanda suficiente que las justifique. Sus principales inconvenientes son la complicación que causa al sistema de control de tráfico aéreo y el incremento del espacio aéreo libre requerido por el aeropuerto.



La separación entre pistas paralelas se clasifica en tres rangos en función de que tan independientes son entre sí en condiciones de vuelo instrumental (IFR).

CLASIFICACIÓN	SEPARACIÓN (m)
Próximas	210-1050
Intermedias	1050-1300
Alojadas	> 1500

Bajo condiciones de vuelo instrumental, las pistas pueden operar totalmente independientes. En el caso de

que los edificios esten situados entre las pistas, deberá considerarse tambien el espacio suficiente para estacionamiento vehicular, edificios, plataformas y calles de rodaje. En caso de proyectar 4 pistas paralelas la distancia entre cada par, podria ser menor a la de "pista proxima" pero conservando la distancia intermedia en cada par según la clasificación.

A continuación se muestran las capacidades de las pistas paralelas en condiciones de vuelo instrumental (IFR) para aviación comercial:

CLASIFICACIÓN	CAPACIDAD	
Próximas	50 - 60	
Intermedias	70 - 80	(operaciones/hora)
Alejadas	85 - 105	

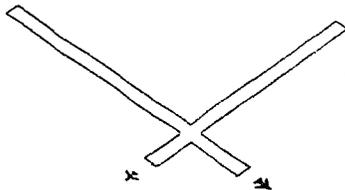
En condiciones visuales (VFR) la capacidad de las pistas paralelas varia entre 100 y 200 operaciones/hora, sin embargo, al igual que en el caso de operaciones (IFR) la capacidad estará tambien en función del tamaño y velocidad de los aviones que realizan las operaciones, teniendo la mayor capacidad para los aviones pequeños de la aviación general. Esto ultimo debido a que los tiempos de ocupación de pista disminuyen gracias a las bajas velocidades que requieren para sus operaciones.

Existe una modalidad de pistas paralelas conocida como "de doble calzada" (dual-line), su particularidad estriba en que una es utilizada sólo para despegues y la otra sólo para aterrizajes en lugar de operar cada una como pista independiente, el mejor funcionamiento de estas pistas se logra cuando la pista exterior (la más alejada del edificio) se usa solo para aterrizajes y la pista interior solo para despegues debido a que los aviones realizan el rodaje previo al despegue con su peso máximo. Se ha estimado que si la relación despegues/aterrizajes se conserva, ésta configuración puede alcanzar un incremento en la

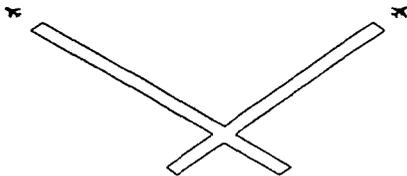
capacidad de aproximadamente un 70% más que una pista única en condiciones VFR y de 60% más en condiciones IFR, pero dicha condición casi nunca se presenta. La mejor opción entre pistas paralelas "independientes" o "de doble calzada" solo podrá obtenerse mediante un estudio de frecuencia de las operaciones y de construcción de procedimientos de vuelo, en base al cual, podríamos determinar las ventajas y desventajas para cada caso particular.

3. Las pistas que se cortan, son necesarias cuando se presentan vientos en más de una dirección, ya que de existir una sola pista, estaría sujeta a vientos cruzados. Al existir dos pistas en dos direcciones podrá utilizarse siempre una pista alternativamente en función de la dirección del viento dominante en ese momento, de manera que la capacidad de las pistas cruzadas sería parecida a la de la pista única si los vientos locales no permiten su utilización simultánea.

En caso de que los vientos sean ligeros pueden utilizarse simultáneamente las dos pistas, entonces su capacidad dependerá en gran parte de la ubicación del punto de intersección de las pistas respecto a su longitud total y del sentido de operación. La capacidad más baja, se tendrá cuando el punto de intersección esté situado en el extremo opuesto de la cabecera de despegue y del umbral de aterrizaje.

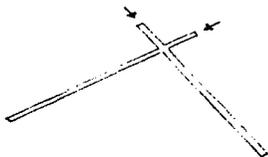


La mayor capacidad, se tendrá cuando el punto de intersección esté situado cerca del umbral de aterrizaje y de la cabecera de despegue.



En los siguientes esquemas se puede ver como varía la capacidad en función de la geometría de pistas, y las condiciones de vuelo (IFR / VFR).

Condiciones Capacidad (operaciones/hora)

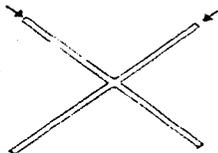


IFR

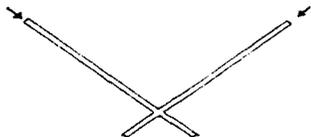
60 - 70

VFR

70 - 175

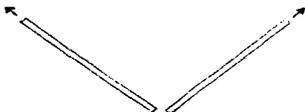


IFR	45 - 60
VFR	50 - 100

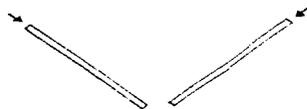


IFR	40 - 55
VFR	60 - 100

4. Las pistas en V, son aquellas pistas divergentes pero que no se cruzan. Al igual que en las pistas que se cortan su capacidad se reduce a la de una pista única para vientos fuertes y puede operarse en las dos pistas con vientos ligeros. En este último caso, la forma que da mayor capacidad es aquella en la que los despegues se hacen comenzando desde el vértice de la V.



IFR	60 - 70
VFR	80 - 200



IFR	50 - 60
VFR	50 - 100

Como ya se mencionó, los factores que influyen en la determinación del número y la orientación de las pistas, son diversos, el factor de primordial importancia es la distribución de vientos, ya que por razones aerodinámicas el avión será más maniobrable cuando realice el aterrizaje o despegue con viento en contra, por lo que la pista se orientará en dirección de viento dominante, los aviones pueden maniobrar sobre la pista mientras que la componente del viento perpendicular al eje de la pista (viento lateral) no sea excesiva, el máximo viento lateral permisible depende del tamaño y peso del avión, la configuración del ala y de las condiciones de la superficie del pavimento, en general se ha estimado que los aviones de transporte se pueden maniobrar (aunque con dificultad) con vientos laterales de hasta 54 km/h, por lo que la O.A.C.I. ha especificado que las pistas deben orientarse de manera que los aviones puedan aterrizar por lo menos el 95 % del tiempo con viento a favor y con componentes de "viento lateral" que no excedan de 37 km/h (20 nudos) en pistas de categoría D y E, 24 km/h (13 nudos) en pistas de categoría C y 18 km/h (10 nudos) en pistas de categoría A y B. (O.A.C.I., anexo 14, cap.3)

La categoría del aeropuerto se indica mediante la clave de referencia que esta en función del tamaño de los aviones que puede servir. A continuación aparece la tabla de clave de referencia. (manual de proyecto de aeródromos, parte 1, O.A.C.I. y Anexo 14)

Elemento 1 de la clave			Elemento 2 de la clave	
Núm. de clave	Longitud de campo de referencia del avión	Letra de clave	Envergadura	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal *
1	Menos de 800 m	A	Hasta 15 m (exclusive)	Hasta 4.5 m (exclusive)
2	Desde 800 m hasta 1200 m (exclusive)	B	Desde 15 hasta 24 m (exclusive)	Desde 4.5 a 6m (exclusive)
3	Desde 1200 m hasta 1800 m (exclusive)	C	Desde 24 hasta 36 m (exclusive)	Desde 6 a 9 m (exclusive)
4	Desde 1800 m en adelante	D	Desde 36 hasta 52 m (exclusive)	Desde 9 a 14 m (exclusive)
		E	Desde 52 hasta 65 m (exclusive)	Desde 9 a 14 m (exclusive)

* Distancia entre los bordes exteriores de las llantas del tren de aterrizaje principal

Una vez que se determina el "viento lateral" máximo permisible para el diseño de una pista en particular, se procede a determinar la dirección más favorable para su emplazamiento según la dirección del viento.

La determinación de la dirección de la pista se hace a partir de un registro de dirección y velocidad del viento que se realiza al menos durante 5 años, tomando lecturas en intervalos constantes de tiempo en los sitios probables para la ubicación del aeropuerto. Con el fin de ilustrar el proceso y poder hacer comentarios en base a sus resultados, se ha planteado un ejemplo en el que se supone que contamos con un registro de 5 años en base a lecturas tomadas cada 10 min., por lo tanto tendremos un total de lecturas igual a:

$$6 \times 24 \text{ hrs} \times 365 \text{ días} \times 5 \text{ años} = 262\ 800 \text{ lecturas}$$

Que serán el 100% de las lecturas. El número de lecturas obtenidas en cada dirección para la misma velocidad, será entonces una cantidad en porcentaje del total, con lo que podremos dibujar una rosa de vientos que represente la dirección e intensidad de los vientos en la zona de posible ubicación del aeropuerto. Para el ejemplo supongamos que se obtienen los siguientes datos:

REGISTRO DE LECTURAS DE VIENTO POR CINCO AÑOS.

DIRECCIÓN	VELOCIDAD DEL VIENTO (km/h)			
	0 - 6	6 - 24	24 - 49	49 - 75
N	556	12614	2416	263
NNE	218	9724	2102	
NE	256	3942	263	
NNE	370	6044	789	
E	466	6307	1951	
ESE	660	13140	2891	
SE	1385	16319	8409	263
SSE	1692	19185	20236	789
S	1786	11586	5782	263
SSW	433	6833	2365	
SW	412	4205	253	
WSW	476	6147	1050	
W	302	4990	789	
WNW	906	15242	5835	526
NW	1000	12615	6307	526
NNW	1180	20499	12878	789
	12089	171669	75424	3410

Total: 262 800 lecturas.

Se considera viento calma a los menores de 6 km/h.

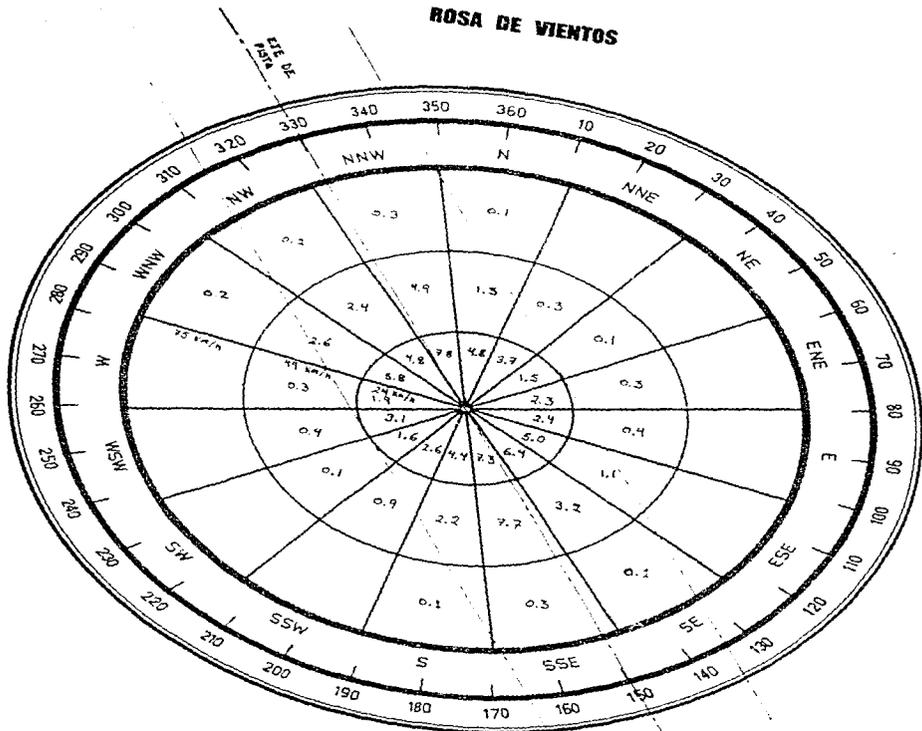
El porcentaje de vientos en una dirección dada y para una gama de velocidades, se marca en su

correspondiente sector de la rosa de vientos. Después sobre una tira de material transparente se trazan tres líneas paralelas y equidistantes entre sí, la línea central representará el eje de la pista y la distancia entre ésta y las líneas exteriores, deberá ser a escala, la componente permisible de "viento lateral", que como se vió, depende de la categoría del aeropuerto, (para nuestro ejemplo se considera un viento lateral permisible de 24 km/h, que corresponde a una pista de categoría c).

La tira transparente se coloca sobre la rosa de vientos de manera que la recta que representa el eje de la pista pase por el centro de la rosa, con este centro como pivote se girará la tira transparente para cada 10° equivalentes a la designación de cada pista hasta que la suma de los porcentajes de los sectores incluidos entre las líneas exteriores de la rosa de vientos sea la máxima o al menos el 95%. Cuando una de dichas líneas exteriores de la tira transparente divide algún segmento de dirección del viento, la parte fraccionaria se estima visualmente en décimas del tanto por ciento que representa dicha dirección. Aunque éste procedimiento parezca inexacto en realidad es coherente con la precisión de los datos que se tienen sobre el viento.

La rosa de vientos cruzados correspondiente a los datos y explicación anteriores se muestra en la sig. página.

ROSA DE VIENTOS



Finalmente se leerá el rumbo de la pista en la rosa de vientos. Del ejemplo podemos ver entonces, que una pista que esté orientada de 150° - 330° , es decir S30E, será la pista con orientación óptima en función de nuestros datos de viento, la pista se enumerará como 15-33 y permitirá que el 96.56 % del tiempo se realicen operaciones con viento favorable tal como se muestra en la siguiente tabla de porcentajes:

VELOCIDAD Km/h	ORIENTACION DE PISTA								
	18-36	01-19	02-20	03-21	04-22	05-23	06-24	07-25	08-26
0-6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
6-24	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4
24-49	20.1	18.3	11.8	8.1	4.6	4.3	4.1	4.22	5.1
49-75	0.5	0.2	1.4	0.08					0.02
*	90.6	88.5	83.2	78.38	74.6	74.3	74.1	74.2	75.12

VELOCIDAD Km/h	ORIENTACION DE PISTA								
	09-27	10-28	11-29	12-30	13-31	14-32	15-33	16-34	17-35
0-6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
6-24	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4
24-49	6.5	8.8	13.6	17.5	23.6	24.9	25.6	24.3	23.5
49-75	0.1	0.18	0.4	0.45	0.7	0.8	0.96	0.9	0.8
*	76.6	78.98	84.0	87.95	94.3	94.8	96.56	95.2	94.3

NOTA: Si los datos del viento están referidos al norte geográfico, habrá necesidad de considerar la declinación magnética del lugar para la designación de la pista, aunque en la mayoría de los casos no es significativa. (Aeropuertos, cap. 6, N.Ashford y Wright)

De la tabla anterior podemos observar que la pista idónea desde el punto de vista de

aprovechamiento del viento es la 15-33, sin embargo, al diseñar los procedimientos para las operaciones en la pista y revisar si cumple con los espacios aéreos que recomienda la O.A.C.I. podríamos encontrar alguna limitación a las operaciones que pudiera evitarse si se constuyera la pista 16-34 que también tiene más del 95% del tiempo vientos favorables, e inclusive, en un caso extremo obligado por las exigencias de los factores antes mencionados, podría optarse por la construcción de la pista 14-32.

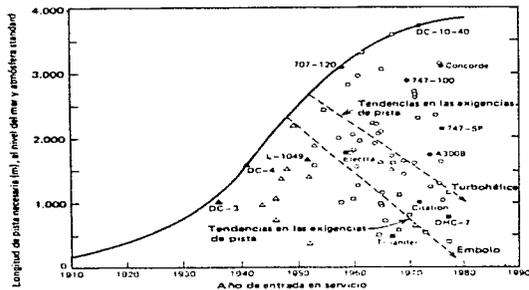
La tabla de porcentajes del ejemplo anterior nos sirve también para apreciar que si en vez de buscar la orientación de una pista de categoría "C" con vientos laterales permisibles de 24 km/h hubieramos buscado la orientación para una pista de categoría "D" o "E" que nos permiten vientos laterales de 38 km/h, el ancho de la tira transparente (que representa a escala la tolerancia al viento lateral) hubiera sido mayor y por lo tanto tendríamos cuatro orientaciones que cumplirían con el porcentaje de 95% del tiempo con vientos a favor. Lo que significa que para un sitio dado, a mayor longitud de pistas tendremos más opciones de orientación. Esto último, siempre y cuando, las condiciones locales del viento lo permitan.

2.2 DETERMINACIÓN DE LONGITUDES.

La evolución de la aviación comercial hasta nuestros días ha tenido como finalidad la mayor productividad de los aviones, que se logra al aumentar sus capacidades de carga útil y de alcance, es decir, que se diseñan cada vez aviones que pueden transportar mayor carga de pago y recorrer mayores distancias sin hacer escalas, lo que significa más peso por concepto de carga, más peso de combustible por la mayor potencia requerida y las distancias que se pretende alcanzar y consecuentemente mayor peso del avión en sí, debido a su aumento de

tamaño. Lo que ha motivado la necesidad creciente de pistas más anchas debido al aumento de anchura de los fuselajes y la envergadura de los aviones, con mayores resistencias de pavimento y longitudes más grandes que sean suficientes para lograr el frenaje de los aviones que al tener mayores masas necesitan tomar pista a velocidades más altas.

A continuación se muestra una gráfica que muestra la tendencia histórica que ha tenido el desarrollo de la aviación comercial debido a los factores antes expuestos.



Tendencias en la longitud de pista ^ motores alternativos, \square turbohélices, \bullet reactores puros y de doble flujo

Existe también la modalidad de aterrizaje y despegue vertical conocida como VTOL (vertical take off and landing) que comprende a los helicópteros y algunos aviones como el Harrier y el Ryan XV-5B que actualmente tienen aplicaciones militares y de investigación. Pero su uso comercial está restringido debido a los grandes volúmenes de combustible que

se requerirían para sustentar el avión durante el despegue y el aterrizaje. De modo que aunque pareciera una opción para evitar las dificultades y costos de localización, orientación, construcción y mantenimiento de grandes pistas, en realidad, el incremento en el costo del combustible encarecería el transporte aéreo y por lo tanto la evolución de los aviones comerciales hacia este sistema no tendría sentido.

Por lo tanto, la alternativa de evolución de los aviones comerciales que actualmente parece más factible de ser desarrollada debido a las ventajas económicas que podría reportar es la de los aviones STOL (short take off and landing) que pueden transportar pesos relativamente grandes a bajos costos y realizar sus operaciones de aterrizaje y despegue en pistas cortas sacrificando únicamente velocidad y alcance. Claro que la función de las nuevas aeronaves de este tipo que pudieran desarrollarse, sería el transporte aéreo comercial de corto y mediano alcance por lo que la existencia de aviones de fuselaje ancho como los que se mencionaron anteriormente, seguirá siendo indispensable para el transporte de largo alcance. Entonces, en el proyecto de nuevos aeropuertos deberá contemplarse dentro de su plan maestro, la existencia y desarrollo de pistas de gran longitud de categoría internacional así como de pistas STOL, más cortas que atiendan los vuelos de menor alcance para lograr una mejor distribución de las operaciones en función de sus necesidades de longitud de pista y de la demanda de vuelos de diferente alcance en cada caso particular.

En la década de los años 70 inició la operación de los aviones de fuselaje ancho como los B-747, DC-10, TU-154 y más recientemente los A-300 y A-310 cuyas dimensiones pueden apreciarse en las tablas que aparecen al final de este subtema para poder compararlas con las de otros aviones.

De lo anterior se puede concluir que el desarrollo futuro de la aviación comercial continuará con la tendencia hacia la construcción de aviones que

requieran pistas de grandes dimensiones o que por lo menos continuarán con las necesidades actuales de longitud, y que además el desarrollo de aviones STOL y VISTOL posiblemente requerirá mayores anchos de pista, pero que por lo pronto utilizarán pistas de categoría B y C. Por lo tanto, los criterios de diseño que se presentan a continuación, proporcionarán buenos resultados tanto para nuevos proyectos como para la ampliación de los ya existentes.

Existen diversos factores que influyen en los requerimientos de longitud de pista. Las características de comportamiento y masas de operación de los aviones determinan su requerimiento básico de longitud de pista que es calculado y publicado por el fabricante con el nombre de "longitud de campo de referencia" y es la longitud de pista necesaria para poder:

- 1) Realizar el despegue hasta 10.5 m de altura con todos los motores funcionando.
- 2) Realizar el despegue hasta 10.5 m de altura con fallo e motor en un punto crítico.
- 3) Pararse tras abortar el despegue por fallo de motor en el punto crítico.
- 4) Detenerse tras un aterrizaje desde una altura de 15 m.

Aeropuertos, Ashford & Wright, cap.3

Las condiciones meteorológicas, principalmente viento y temperatura ambiente en la superficie, están relacionadas con el mayor o menor enfrenamiento aerodinámico y con la fricción de los neumáticos con la pista respectivamente, por lo que ambos tendrán un efecto en la longitud. Por ejemplo, un avión con viento de frente "en contra" podrá realizar el aterrizaje en una distancia menor que otro de iguales características con viento calma y mucho menor que el mismo con viento "a favor". De igual forma se

verán afectadas las longitudes de aterrizaje, aunque en general las de despegue son mayores.

A mayor temperatura ambiente en la superficie, se incrementa el coeficiente de fricción entre el pavimento y los neumáticos del avión por efecto del aumento en la deformabilidad de ambos, lo cual es favorable en los aterrizajes pero aumenta la necesidad de longitud para el despegue. Por otro lado, entre mayor sea la temperatura del sitio, la pista requerirá de mayor longitud debido a que las temperaturas elevadas provocan menor densidad del aire y por lo tanto, se reduce el empuje producido por los motores, así como la fuerza de sustentación.

En el caso de lluvia, la longitud necesaria para ambas operaciones se incrementa debido al bajo coeficiente de fricción en aterrizajes y a al impulso perdido debido a la fuerza necesaria para que los neumáticos del tren de aterrizaje desplacen lateralmente el agua durante el despegue.

Por otra parte, la pendiente de la pista es favorable a los aterrizajes si aumenta en el sentido de las operaciones, pero hará necesaria mayor longitud para los despegues, si la pendiente disminuye en el sentido de las operaciones el efecto será inverso, pero considerando que en general la longitud requerida para el despegue es mayor que la de aterrizaje, el segundo caso será el más conveniente.

Otros factores relacionados con el emplazamiento mismo del aeropuerto como son: elevación, índice de presión barométrica y limitaciones topográficas afectan la longitud de pista, por ejemplo, tenemos que a mayor elevación del aeropuerto la presión barométrica es menor y la pista requerirá una mayor longitud. La influencia de estos factores puede tomarse en cuenta generalmente mediante correcciones sencillas que se describirán más adelante mediante un ejemplo.

LONGITUD EFECTIVA DE PISTA.

La longitud verdadera de toda pista deberá ser adecuada para satisfacer los requisitos operacionales de los aviones para los que se proyecte la pista, más la longitud extra resultante de las correcciones correspondientes a las condiciones locales y a las características de operación de los aviones. Para este cálculo, se podrán usar los datos de un avión que se considere crítico, es decir, el de mayores dimensiones que el aeropuerto vaya a servir, con lo que se obtendrá un buen diseño que cubra todos los casos.

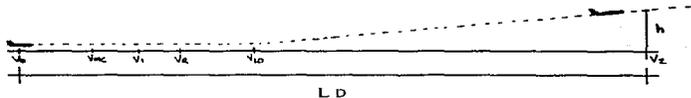
Para obtener los datos del avión crítico antes mencionado, se dispone de manuales de vuelo con información sobre las características de operación de los aviones modernos. También existen curvas y tablas del comportamiento de los aviones, para los efectos básicos de la planificación de pistas. En las siguientes páginas, aparecen gráficas de algunos aviones.

Dichas gráficas, se obtienen en base a las características del avión y condiciones atmosféricas estandar por parte de los fabricantes.

Otras distancias complementarias de la longitud de pista son las zonas de parada y zonas adicionales libres de obstáculos cuando se usan pistas desbalanceadas, las cuales, se tratarán más adelante. Estas distancias son en realidad prolongaciones de la pista y tienen la finalidad de proporcionar un margen de seguridad mayor en las operaciones de aterrizaje y despegue, ya que la longitud extra que proporcionan será seguramente necesaria en casos de falla de motores durante el despegue o exceso de velocidad en el aterrizaje.

Ahora se analizarán las etapas de uso de la pista por parte del avión, lo que nos dará la posibilidad de calcular la longitud requerida de pista, y entender las situaciones que pueden presentarse durante su utilización.

En la situación de un despegue, el avión estará primeramente al inicio de la pista con los motores funcionando en baja potencia, con los frenos aplicados y con velocidad cero (V_0). Al recibir la autorización de la torre para despegar, se relevarán los frenos, aumentando la potencia en forma gradual, por lo que el avión comenzará a moverse con cierta aceleración. El avión será controlable por efecto de las fuerzas aerodinámicas hasta alcanzar una velocidad mínima de control (V_{mc}). Se continuará avanzando e incrementando su velocidad hasta que en un punto de la longitud de la pista se llega a una velocidad conocida como "de decisión" (V_1), antes de la cual puede abortarse el despegue y después de la cual habrá que despegar (el motivo se explica más adelante). Pasando este punto y continuando la aceleración, el avión alcanzará la velocidad de rotación (V_r), a partir de la cual el tren de aterrizaje de proa se levantará. Al llegar a la velocidad conocida como "lift-off" (V_{lo}) el piloto podrá comenzar el ascenso, el avión continuará dicho ascenso sobrevolando la pista y alcanzando la velocidad de ascenso seguro (V_2). Se considera que abandona la zona de pista hasta que el avión llegue con las pendientes especificadas a 15 m de altura en caso de motores de hélice o 10.5 m en caso de aviones con turbina. La proyección sobre el terreno de dicho punto nos indicará el fin de la longitud de despegue.



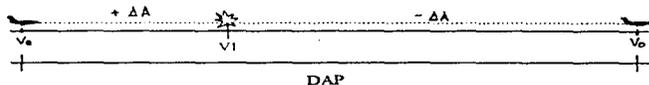
L D

($h = 15$ ó 10.5 m dependiendo del tipo de motores)

L_D = Longitud de despegue, designada como TORA por la O.A.C.I.

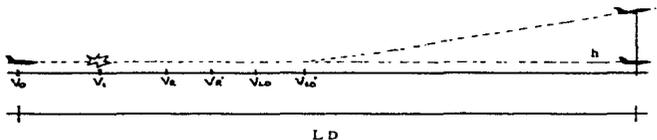
Sin embargo, existe la posibilidad de que falle el motor crítico durante la maniobra de despegue. Si la falla se presenta después de alcanzar la velocidad de decisión (V_1), el piloto deberá continuar el despegue que podrá realizarse pese a la disminución de potencia y de lo contrario el avión se saldrá de la pista. Si la falla ocurre antes de (V_1) deberá abortarse el despegue y no se tendrá ninguna dificultad para frenar el avión antes del fin de la pista. Cuando la falla ocurre en el momento de alcanzar (V_1), el piloto tendrá la opción de continuar o de abortar el despegue.

En el primer caso, cuando la falla de motor ocurre en (V_1) y el piloto decide abortar el despegue, el avión requerirá una cierta longitud para desacelerar hasta detenerse, la distancia necesaria para lograrlo se llama "distancia de aceleración de parada" (DAP) designada como ASDA por la O.A.C.I.



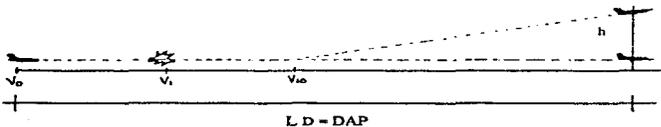
En el segundo caso, cuando la falla se presenta en (V_1) y el piloto decide continuar, el avión necesitará recorrer una mayor longitud de pista debido a la pérdida de potencia antes de poder alcanzar la velocidad

(V2) y por lo tanto se alcanzará la altura "h" sobre el nivel de la pista después de recorrer una mayor distancia, por lo que se necesitará una mayor longitud de despegue que la normal, conocida como "Lp" con falla de motor en V1, designada por la O.A.C.I. como TODA y que es la mayor longitud requerida de pista.

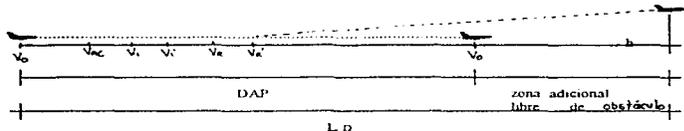


PISTA BALANCEADA.

Es el nombre que recibe la pista que tiene una velocidad de decisión V_1 , tal que su longitud de despegue es igual a la longitud de aceleración parada. De manera que la pista estará balanceada o desbalanceada dependiendo de la V_1 que escogan los despachadores aéreos para cada avión en función de su peso y de las condiciones atmosféricas en el momento. La decisión que tomen sobre la V_1 se basa en los manuales de operación de la aeronave en cuestión.

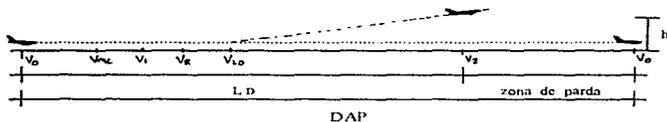


Existen 2 casos de pistas desbalanceadas, es decir, que LD es diferente que DAP. El primer caso es aquel en el que la longitud de despegue es mayor que la distancia de aceleración parada "DAP" debido a una falla de motor en V1 cuando se tiene una V1 menor que la V1 balanceada por lo que deberá considerarse una zona adicional libre de obstáculos (clear way) a manera de prolongación de la pista que necesita pavimento o al menos mejoramiento del terreno hasta donde el avión alcanza la altura "h" respectiva.



La zona adicional también puede representar una ventaja económica ya que si reducimos la velocidad de decisión V_1 , la distancia de aceleración parada (DAP) será menor en relación con la longitud de despegue (LD), que puede darse mediante zonas adicionales libres de obstáculos con la finalidad de reducir la longitud requerida de pavimento de plena resistencia. Ahora bien, si la pista esta provista de zona adicional libre de obstáculos pero no cuenta con zona de parada sería recomendable que el suelo de de la zona adicional tuviera al menos un suelo compactado y mejorado para poder soportar el peso de un avión en caso de sobrepase de pista debido a exceso de velocidad o falla de frenos.

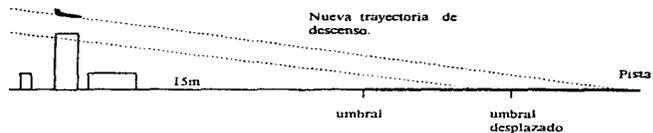
El segundo caso, es aquel en el que la longitud de despegue con falla de motor en V_1 es menor que la longitud de aceleración parada. Se presentará cuando V_1 sea mayor que la V_1 balanceada y que por lo tanto necesitará una zona de parada para completar la DAP. Esta zona será necesaria también cuando por algún motivo, un avión aterrice a mayor velocidad que la debida, necesitando entonces una mayor longitud de pista que la normal para poder detenerse. Por lo que la "zona de parada", proporcionará a la pista una longitud extra que deberá estar provista de algún pavimento sencillo o suelo mejorado que sea capaz de soportar el peso del avión más pesado de la flota sin causarle daño estructural.



La pista también puede desbalancearse de manera intencional cuando por alguna razón es necesario desplazar el umbral y por lo tanto la longitud efectiva de pista disminuye, claro que en esta situación el uso de la zona de parada sería intenso y por lo tanto el pavimento sencillo del que este provista deberá sustituirse por pavimento de plena resistencia ya que formará parte de la longitud efectiva de pista, y además, deberá proyectarse otra

prolongación de ésta que será la nueva zona de parada con algún pavimento de resistencia media.

El obstáculo puede ser librado aumentando la pendiente de descenso o desplazando el umbral permanentemente, la mejor opción deberá analizarse para cada caso particular.



En el esquema se muestra un caso en el que debido a la construcción de un obstáculo en la zona de aproximación, es necesario desplazar el umbral de una pista ya existente.

En realidad desplazar el umbral por algún motivo como el anterior representara un desperdicio de pista, por lo que de ser posible deberán preverse las dificultades con los propietarios de inmuebles y terrenos aledaños al aeropuerto mediante la compra, expropiación, o reglamentación de la altura de las construcciones por parte del gobierno local.

La O.A.C.I. recomienda el uso de la sig. nomenclatura para las distancias que hemos analizado y que llama distancias declaradas:

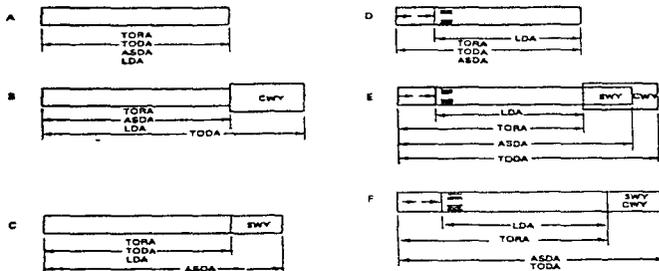
a) Recorrido de despegue disponible (TORA), que es la longitud de la pista que se ha declarado disponible y adecuada para el recorrido en tierra de un avión que despegue.

b) Distancia de despegue disponible (TODA), que es la longitud de recorrido de despegue disponible más la longitud adicional libre de obstáculos (en caso de que la pista este desbalanceada)

c) Distancia de aceleración-~~parada~~ disponible (ASDA), que es la longitud del recorrido de despegue disponible más la longitud de la zona de ~~parada~~ (en caso de haberla)

d) Distancia de aterrizaje disponible (LDA), que es la longitud de la pista que se ha declarado disponible y adecuada para el recorrido en tierra del avión que aterriza.

Si la pista no esta provista con zona de parada ni zona libre de obstáculos y además el umbral esta situado en el extremo de la pista, entonces las 4 distancias declaradas tendrán una longitud igual a la de la pista. En la sig. gráfica se muestran esquemáticamente los casos posibles.



Para presentar información respecto a las distancias declaradas, se sugiere el formato que aparece al final del párrafo, en caso de que

CÁLCULO DE LONGITUD DE PISTA POR EL MÉTODO DE CORRECCIONES.

El método de correcciones consiste en hacer incrementos a la longitud de campo de referencia del avión crítico de la flota que va a operar en la pista, dicha longitud es la necesaria para el despegue y el aterrizaje en condiciones correspondientes a la atmósfera tipo, a la elevación cero, con viento calma y pendiente nula.

La longitud de campo de referencia deberá aumentarse en 7 % de la longitud por cada 300 m de elevación.

La longitud de la pista corregida por temperatura deberá aumentarse en 1 % por cada grado centígrado que la temperatura del aeropuerto exceda la temperatura de la atmósfera estandar tipo correspondiente a la elevación del aeropuerto. Finalmente se hará una corrección por pendiente, incrementando la longitud 10 % por cada 1 % de pendiente efectiva.

CÁLCULO DE LONGITUD DE PISTA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MANUALES DE VUELO.

El método se basa en la información contenida en los manuales de vuelo de los aviones respecto a sus características operacionales y su comportamiento en diversas condiciones de elevación, temperatura y pendiente de la pista, esta información aparece condensada en gráficas y deberá verificarse que el manual provenga de pruebas reales. El diseño de longitud se hará para el avión con mayor masa de la flota que será también el que requiere mayor longitud de pista, de manera que el diseño cubrirá las distancias requeridas por los demás aviones.

A continuación se explica el concepto de "atmósfera tipo" que servirá para entender mejor los

métodos de diseño y los efectos atmosféricos en la longitud de pista.

ATMÓSFERA TIPO.

Debido a que las características atmosféricas cambian de un día a otro y según la ubicación geográfica del lugar, ha sido necesario establecer un parámetro al cual referir los cálculos relacionados con las condiciones atmosféricas y su influencia en el comportamiento de los aviones, la O.A.C.I. estableció las características de la atmósfera tipo mediante un convenio.

En realidad es una atmósfera hipotética en la que se supone que desde el nivel del mar hasta una altitud de 11000 m (troposfera), la temperatura decrece linealmente, de los 11000 m hasta los 20000 m la temperatura se mantiene constante y después de los 20000 m la temperatura crece.

En la troposfera, la atmósfera tipo se define de la siguiente manera:

- a) La temperatura a nivel del mar es de 15 grados centígrados (59 grados fahrenheit).
- b) La presión a nivel del mar es de 760 mm Hg (1.033 kg/cm²)
- c) El gradiente de temperatura desde el nivel del mar hasta la altura en que la temperatura llega a -56.5 grados centígrados (-69.7 grados fahrenheit) es -0.0065 grados centígrados por metro (-0.003566 grados fahrenheit por pie), por encima de los 11000 m el gradiente es nulo según se explicó anteriormente.
- d) Mediante la siguiente expresión se puede obtener la presión tipo en la troposfera a diferentes temperaturas hasta llegar a la temperatura de -56.5 grados centígrados.

$$P_0/P = (T_0/T)$$

donde:

P_0 - presión tipo a nivel del mar, (760 mm Hg)

P - presión tipo a la altura especificada

T_0 - temperatura a nivel del mar (15 grados celsius)

T - temperatura tipo a una altitud especificada

A continuación aparece una tabla que relaciona la temperatura, presión y velocidad del sonido con la altitud dentro de la atmosfera tipo.

Altitud (m)	Temperatura (°C)	Presión (mm Hg)	Velocidad del sonido (m/s)
0.0	15.0	760.0	340.29
300.0	13.0	733.3	339.14
600.0	11.1	707.5	337.98
900.0	9.1	682.3	336.82
1200.0	7.2	657.9	335.65
1500.0	5.2	634.2	334.49
1800.0	3.3	611.2	333.31
2100.0	1.3	588.9	332.14
2400.0	-0.6	567.2	330.96
2700.0	-2.5	546.2	329.77
3000.0	-4.5	525.8	328.58
3300.0	-6.4	506.1	327.38
3600.0	-8.4	486.9	326.18
3900.0	-10.3	468.4	324.98
4200.0	-12.3	450.4	323.77
4500.0	-14.2	433.0	322.56
4800.0	-16.2	416.1	321.34
5100.0	-18.1	399.8	320.12
5400.0	-20.1	384.0	318.89
5700.0	-22.0	368.7	317.66
6000.0	-24.0	353.9	316.43

Ref. "planificación y diseño de aeropuertos", cap.3, Robert Horonjeff.

Ejemplo de cálculo de longitud de pista por el método de las correcciones.

1) datos:

* Avión de diseño: B-727-100

* Longitud de pista para aterrizar a nivel del mar en condiciones de atmósfera tipo: 2100 m

* Longitud de pista requerida para el despegue en un emplazamiento plano a nivel del mar en condiciones de atmósfera tipo: 2500 m

* Elevación del aeropuerto: 150 m

* Temperatura de referencia del aeropuerto: 24 grados centígrados

* Temperatura a 150 m en la atmósfera tipo (Interpolando de la tabla anterior): 14.025 grados centígrados

puede obtenerse también de la siguiente manera:

$$-\Delta t_{\text{EN ESTANDAR}} = -0.0045^{\circ}\text{C}/\text{m}$$

$$-\Delta t_{\text{POR}} = (-0.0045^{\circ}\text{C}/\text{m} \times 150\text{m}) = -0.975^{\circ}\text{C}$$

∴ TEMPERATURA ATMÓSFERA ESTANDAR

$$15^{\circ} - 0.975^{\circ} = \underline{14.025^{\circ}}$$

* Pendiente de pista: 0.5%

2) Correcciones:

Longitud de pista para despegue corregida por elevación.

$$(2500 \times 0.07 \times 150/300) + 2500 = 2587 \text{ m}$$

Longitud de pista para despegue corregida por elevación y temperatura.

$$[2587 \times 0.01 \times (24 - 14.025)] + 2587 = 2845 \text{ m}$$

Longitud de pista para despegue corregida por elevación, temperatura y pendientes.

$$(2845 \times 0.05) + 2845 = 2985 \text{ m}$$

Como la longitud requerida de aterrizaje, es menor que la longitud requerida para despegue, sus respectivas correcciones también darán una longitud menor, por lo tanto, la longitud efectiva de pista será 2985m

Ejemplo de cálculo de longitud de pista mediante el uso de manuales de vuelo.

1) Datos:

- * Avión Boeing 747
- * Altitud del aeropuerto 1220m (4000 pies)
- * Temperatura de referencia: 20 grados centígrados
- * Pendiente ascendente 1%
- * Todas las gráficas empleadas aparecen al terminar el ejercicio.

2) De las gráficas de comportamiento en el despegue, limitación de peso por ascenso, tenemos los sig. pesos máximos autorizados:

ángulo de las aletas	peso (kg)	límite (kg)
10°	292000	306000
20°	280000	294000

3) Las longitudes de pista para pesos máximos autorizados según las gráficas son:

ángulo de las aletas	peso (m)	límite (m)
10°	3700	3950
20°	3550	3700

4) Sin embargo pueden existir restricciones para los pesos máximos dependiendo de la capacidad del avión, supongamos que tenemos también para un caso específico los siguientes datos:

- * **Peso de aterrizaje** 220000 kg
- * **Peso de combustible** 65000 kg
- * **Peso de combustible al aeropuerto** alterno más reserva 5000 kg
- * **Peso de operación seca** 170000 kg

sabemos que:

$$\text{peso real de despegue} = \text{peso de aterrizaje} + \text{peso de combustible}$$

$$220000 + 65000 = 285000 \text{ (kg)}$$

de la tabla anterior del inciso 2 podemos observar que los pesos máximos permisibles son mayores al peso real de despegue excepto para el caso de clima seco con aletas a 20 grados.

$$285000 > 280000$$

por último determinamos las longitudes de pista para el peso real de despegue de éste caso con las diferentes condiciones.

ángulo de las aletas	seco (m)	húmedo (m)
10°	3450	3210
20°	no se puede despegar	2950

Abajo: se muestra la fotografía de la pista 23D-51, ATICM, ed de México que mide 3900 m



Las tablas con longitudes de campo de referencia utilizadas para el método de correcciones aparecen a continuación, después aparecen las gráficas de comportamiento de despegue de un B-747 que se utilizaron para desarrollar el método de manuales

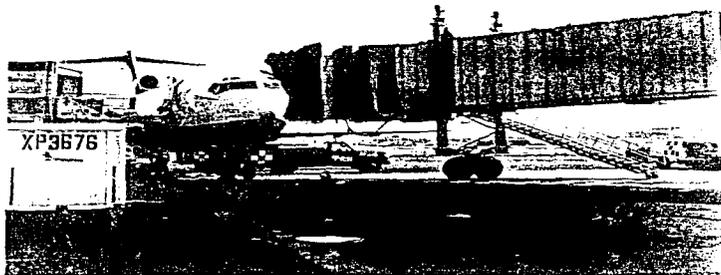
Modelo de aeronave	Clave	Longitud de campo de referencia del avión (m)	Envergadura (m)	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal (m)
1	2	3	4	5
DC-9-20	3C	1 551	28,5	6,0
Fokker F27-...	3C	1 670	29,0	7,9
Fokker F27-500	3C	1 670	29,0	7,9
Fokker F28-3 000	3C	1 640	25,1	5,8
Fokker F28-4 000	3C	1 640	25,1	5,8
Fokker F28-6 000	3C	1 400	25,1	5,8
Fokker 50	3C	1 515	29,0	8,0
Fokker 100	3C	1 540	28,1	6,0
Bae-ATP	3D	1 540	30,6	9,1
Buffalo DHC-5D	3D	1 471	29,3	10,2
Airbus A300 B2	3D	1 676	44,8	10,9
BAC 1-11-200	4C	1 864	27,0	5,2
BAC 1-11-300	4C	2 484	27,0	5,2
BAC 1-11-400	4C	2 420	27,0	5,0
BAC 1-11-475	4C	2 258	28,5	5,1
BAC 1-11-500	4C	2 428	28,5	5,2
B-727-100	4C	2 502	32,9	6,9
B-727-200	4C	3 176	32,9	6,9
B-737-100	4C	2 499	28,4	6,4
B-737-200	4C	2 295	28,4	6,4
B-737 Advanced-200	4C	2 707	28,4	6,4
B-737-300	4C	2 749	28,9	6,4
B-737-400	4C	2 749	28,9	6,4
Caravelle 12	4C	2 600	34,1	3,9
Concorde	4C	3 400	25,5	8,8
DC-9-10	4C	1 975	27,2	3,9
DC-9-30	4C	2 134	28,5	6,0
DC-9-40	4C	2 091	28,5	5,9
DC-9-50	4C	2 451	28,5	5,9
DC-9-80	4C	2 193	32,9	6,2
Trident 1E	4C	2 590	29,0	7,3
Trident 2E	4C	2 790	29,9	7,3
Trident 3	4C	2 670	29,0	7,3
Viscount 800	4C	1 859	28,6	7,9



BIMOTOR DE PISTON EN RODAJE.



AVIÓN B-229 EN ASCENSO



PASARELA EXTENSIBLE ACOPLADA A UN B-727



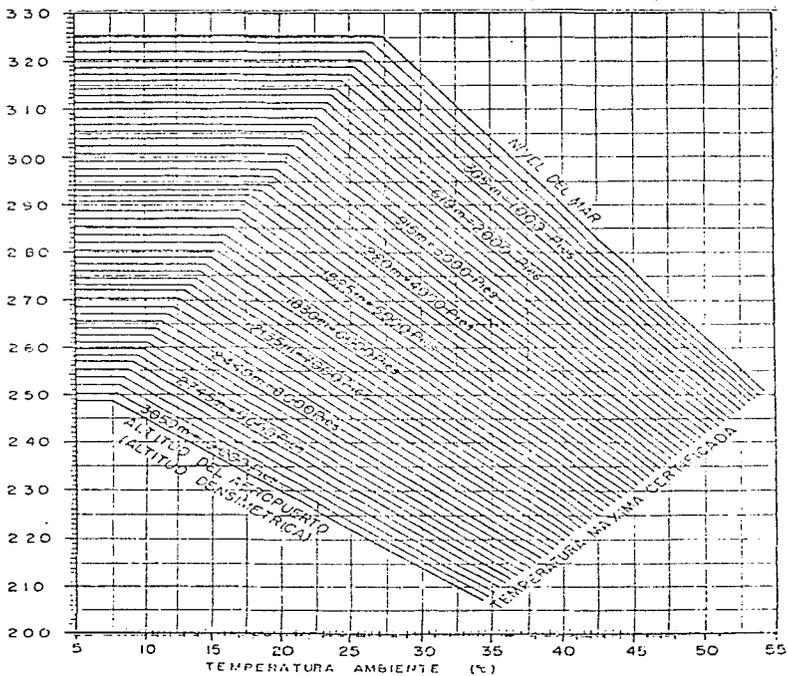
AUTOBUS CON SISTEMA DE ELEVACIÓN ACOPLADO A UN B-727

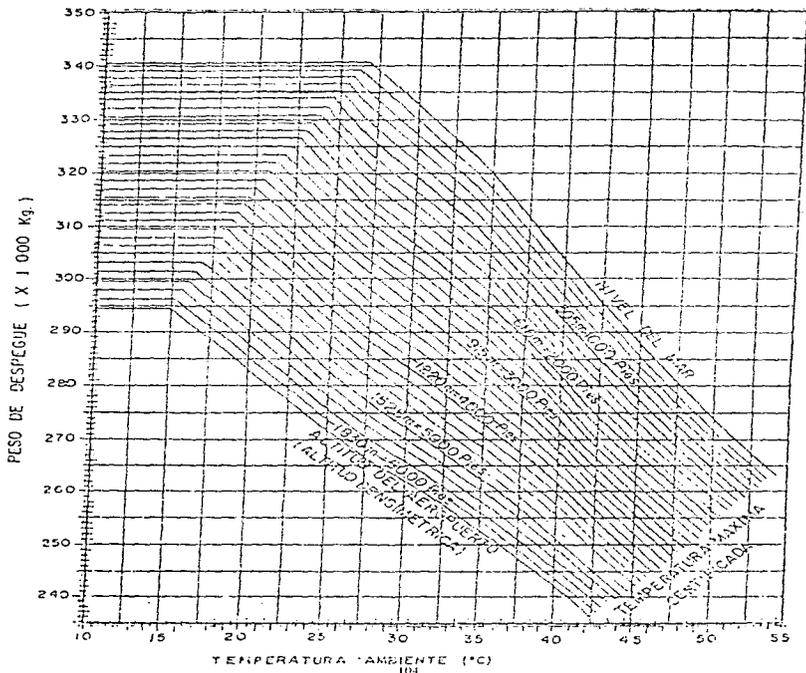


REHOLQUE CON TRACTOR.



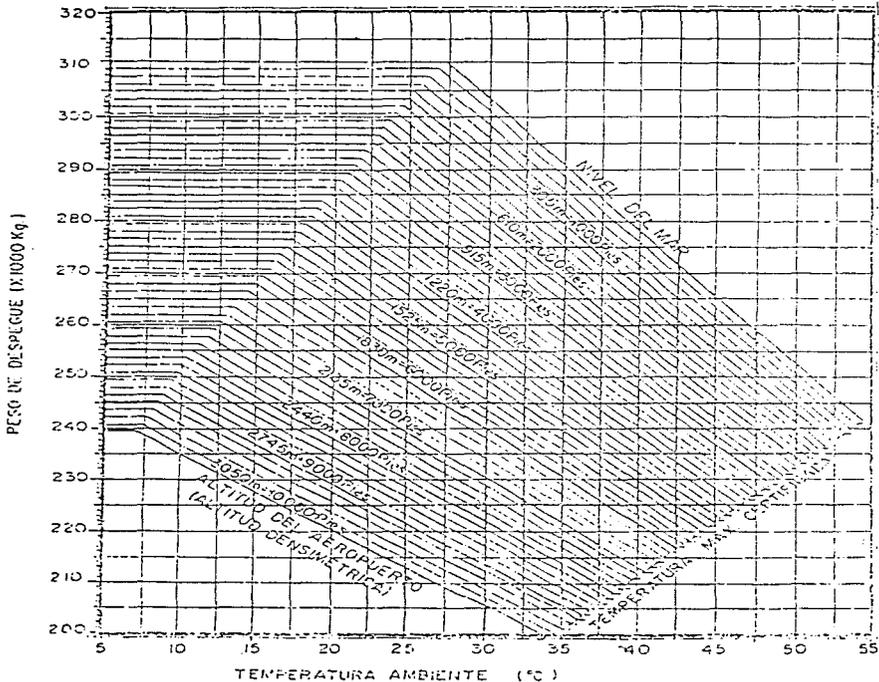
SERVICIOS EN PLATAFORMA REMOTA.





SECO.
 ALETAS 20°

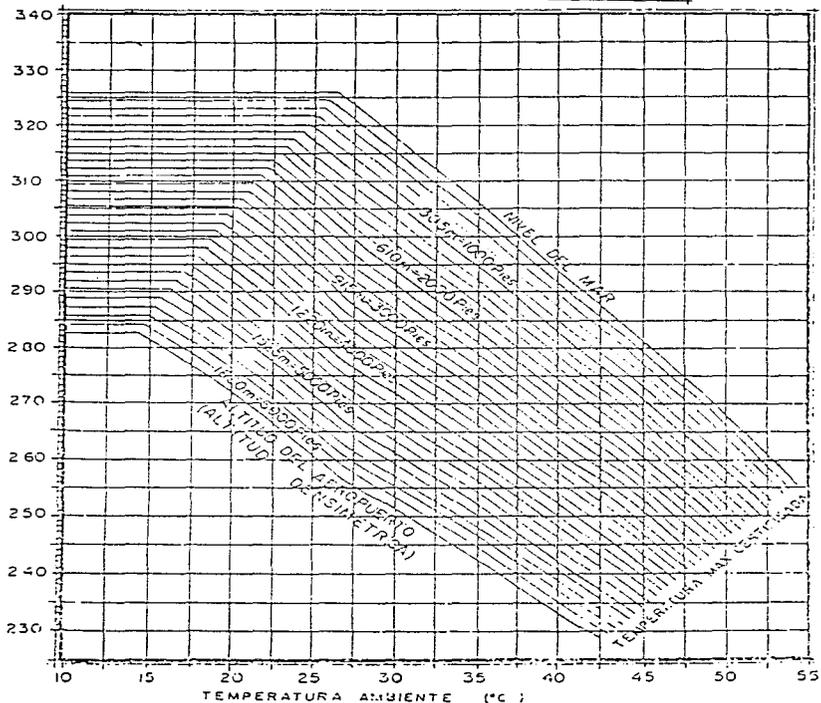
2011C-1157A/10000000

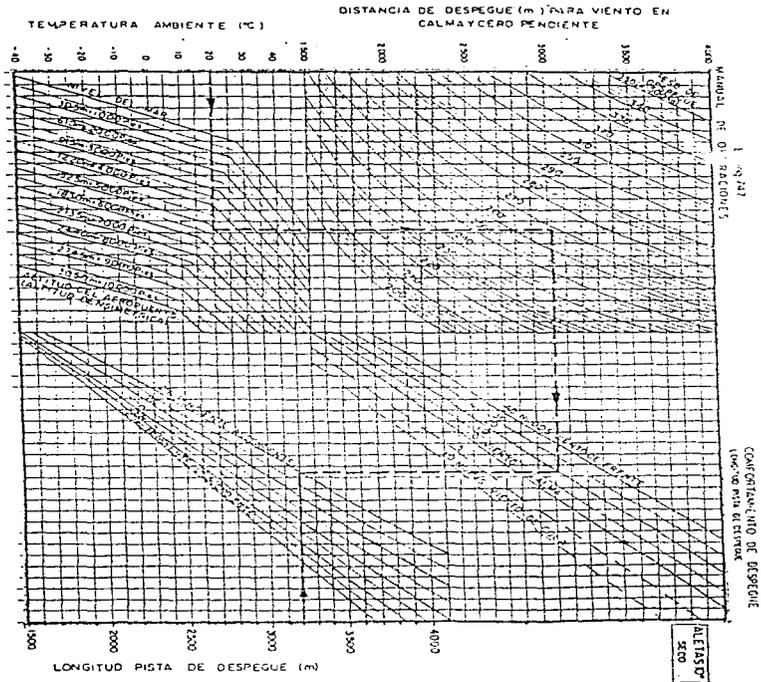


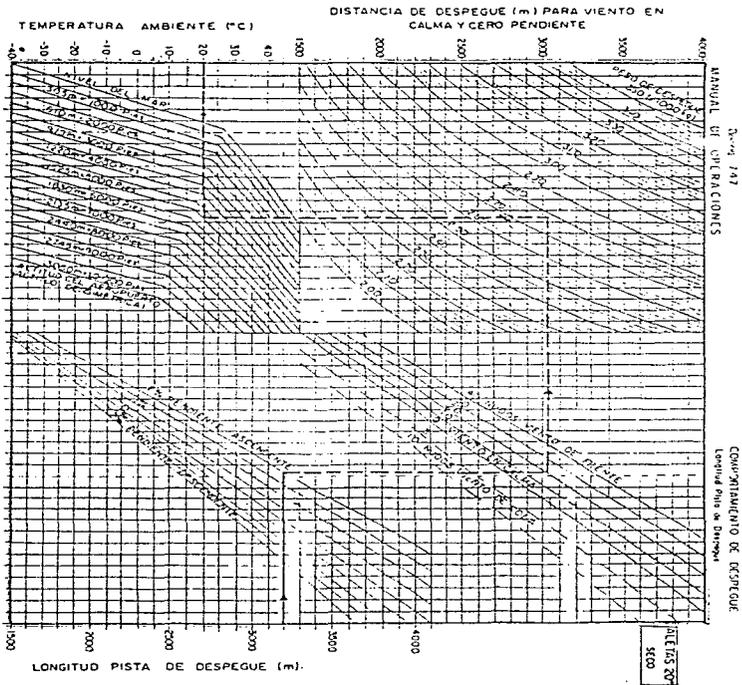
BOEING - 747
 MANUAL DE OPERACIONES

COMPORTAMIENTO DE DESPEGUE
 LIMITACION DE PESO POR ASCENSO.

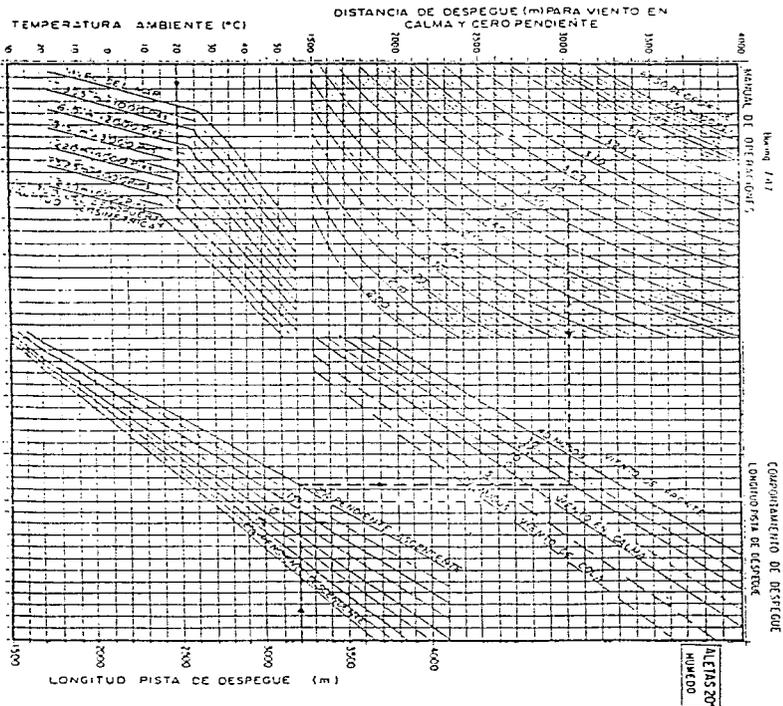
HUMEDO
 ALETAS 20°







PAGINA 16 ESTADIA (IMPRESA)



Una vez determinada la longitud, solo nos restará definir el ancho de pista para complementar el diseño geométrico. El ancho obedece al del fuselaje de los aviones que operarán y su envergadura. Por lo que la O.A.C.I. ha definido su dimensión en función de la clave del aeropuerto. (Anexo 14, O.A.C.I.)

No. de clave	Letra de clave				
	A	B	C	D	E
1	16	18	23	—	—
2	23	23	30	—	—
3	30	30	30	45	—
4	—	—	45	45	45

NOTA: Las longitudes tabuladas están en metros.

Las pendientes longitudinales y transversales de las pistas serán las mismas de las franjas de pista que las contienen, las recomendaciones del "anexo 14" al respecto aparecen adelante.

2.3 MARGENES DE PISTA, FRANJAS Y ÁREAS DE SEGURIDAD.

MARGENES.

Los márgenes de una pista o de una zona de parada tienen la función de reducir al mínimo el peligro que pueda correr un avión que se salga de la pista o de la zona de parada, la O.A.C.I. obliga la existencia de márgenes para toda pista de clave D, E o de anchura inferior a 60 m, siendo opcional en los demás casos.

En algunos casos, la resistencia del terreno natural dentro del área del margen puede ser suficiente para

resistir una eventual carga de avión, cuando el terreno necesite una preparación, el método dependerá de las condiciones locales del terreno y los pesos máximos de los aviones que utilizarán el aeropuerto. En tal caso se realizarán estudios geotécnicos para determinar la solución óptima, dicha solución puede ser drenaje, estabilización, capa de sellado, pavimentación, etc., Deberá tenerse especial cuidado para que el material empleado en la solución no quede libre o fácilmente desprendible, con la finalidad de evitar la ingestión de gravas por las turbinas.

Otro aspecto que debe cuidarse es el contraste visual entre la superficie de la pista y la franja contigua, éste contraste puede lograrse mediante el contraste de diferentes materiales o empleando señales de franja lateral de pista.

Los márgenes deben tener un ancho tal que el ancho de pista más las márgenes nunca sea inferior a 60 m, la superficie de las márgenes debe estar al mismo nivel que la de la pista y su pendiente transversal no debe exceder de 2.5 %.

FRANJA.

El área de franja es en realidad un área de seguridad para prevenir que algún avión se salga de pista, por lo tanto el área deberá estar nivelada y tendrán que tomarse medidas para que cuando la rueda de un avión se hunda en el terreno de la franja no se encuentre con una superficie dura que pudiera romper el tren de aterrizaje al trabarse entre sí, por ejemplo (ductos de instalaciones, registros de drenaje, eléctricos etc.), será inevitable la existencia del montaje de las luces de pista u otras instalaciones dispuestas en la franja o en la intersección con una calle de rodaje u otra pista, pero deberán tener ductos horizontales enterrados a no menos de 30 cm de profundidad.

La franja comprende la pista, márgenes y cualquier zona de seguridad. Se recomienda que dicha franja se extienda longitudinalmente desde antes del umbral y más allá de la pista o de la zona de parada por lo menos:

- 60 m cuando el número de clave sea 2, 3 ó 4.**
- 60 m cuando el número de clave sea 1 y la pista sea de vuelo por instrumentos.**
- 30 m cuando el número de clave sea 1 y la pista sea de vuelo visual.**

El ancho que se da a continuación estará centrado con el eje de la pista. Para los casos de pistas para aproximaciones por instrumentos ya sea de precisión o no, el ancho de franja será al menos:

- 300 m para pistas de clave 3 ó 4.**
- 150 m para pistas de clave 1 ó 2.**

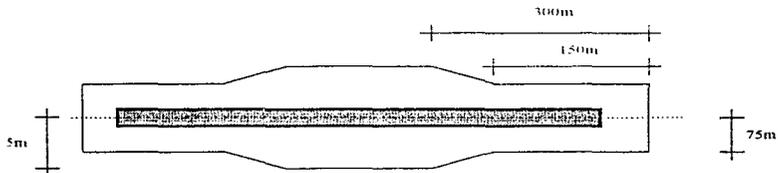
Para pistas de vuelo visual el ancho de franja debe ser:

- 150 m para pistas de clave 3 ó 4.**
- 80 m para pistas de clave 2.**
- 60 m para pistas de clave 1.**

Todo objeto dentro de la franja será considerado como obstáculo y por tanto deberá eliminarse a menos que se trate de ayudas visuales requeridas para la navegación aérea, esta restricción será en un ancho de 120 m centrado con el eje de la pista para pistas de clave 3 ó 4 y de 90 m para pistas de clave 1 ó 2, las ayudas aéreas que deban ser empleadas en esta zona tendrán la menor masa y altura posible, además no se permitirá ningún objeto móvil durante las operaciones de aterrizaje y despegue.

Para pistas de aproximación de precisión de clave 3 o 4 es recomendable dar una anchura mayor de

franja al centro de la misma, ésta recomendación hecha por la O.A.C.I.(Doc 9157 , parte 1) se basó en el estudio de los casos de los aviones que se salen de la pista , se recomienda un ancho de 210 m en la parte media de la franja .



"Manual de proyecto de aeródromos", Doc. 9157-AN/901. Parte 1, O.A.C.I.

Las pendientes para la franja no deben exceder a las siguientes:

No.de clave de pista	Pendiente longitudinal	Pendiente transversal
4	1.5 %	2.5 %
3	1.75 %	2.5 %
1 o 2	2 %	3 %

Las zonas de seguridad de extremo de pista tienen la función de proporcionar una longitud extra para los casos en que los aviones sobrepasan el extremo de pista (vease 3.1 , longitudes) .

En una pista para aproximaciones de precisión, la antena del transmisor I.L.S. es comunmente el primer obstáculo, de manera que queda un espacio libre entre dicha antena y el extremo de pista aunque lo más recomendable es que la zona de seguridad previa a la pista estuviera despejada. Para pistas de vuelo visual se recomienda que las zonas de seguridad se extiendan hasta donde se encuentre el primer obstáculo, que para este tipo de pistas podría ser una vía férrea, carretera, árboles etc., en cualquier caso su longitud no deberá ser menor de 90 m.

La O.A.C.I. prescribe estas zonas de seguridad como necesarias para pistas de clave 3 o 4 y para pistas con número de clave 1 o 2 solo en caso de realizar aterrizajes por instrumentos.

Las pendientes longitudinales y transversales del área de seguridad no deberán ser mayores de 5% y en caso de ser necesarios los cambios de pendiente, deberán ser graduales.

Con la finalidad de que el aeropuerto pueda dar un servicio seguro a aviones que efectúan aproximaciones y aterrizajes con el piloto automático acoplado (independientemente de las condiciones meteorológicas), es necesario que los cambios de pendiente se eviten o reduzcan al mínimo en un área simétrica respecto a la prolongación del eje de la pista de 60 m de ancho por 300 m de longitud antes del umbral de la pista de vuelo por instrumentos. Debido a que ese tipo de aviones están equipados con un radioaltímetro para la guía final de altura y enderezamiento, de manera que los cambios de pendiente en la zona de extremo de pista podrían provocar algún descontrol al radioaltímetro y por tanto al piloto automático. Cuando no pueda evitarse el cambio de pendiente, el régimen de cambio entre 2 pendientes no podrá ser mayor de 2% en 30 m.

La zona libre de obstáculos comienza en el extremo del recorrido de despegue disponible, su longitud no debe ser mayor que la mitad de ésta, ni menor de 240 m para aeropuertos de categoría D y E. Su ancho estará centrado con el eje de la pista y será de 150 m por lo menos.

El terreno de una zona libre de obstáculos no debe sobresalir de un plano inclinado con una pendiente ascendente de 1.25 % siendo el límite inferior del plano una línea horizontal que es perpendicular al plano vertical que contiene al eje de la pista y pasa por un punto situado sobre el eje de la pista al final del recorrido de despegue disponible.

La zona de parada tendrá el mismo ancho de la pista de la cual sea prolongación, es recomendable que las pendientes longitudinales y transversales sean las mismas que las de la sección de pista inmediatamente anterior, en caso extremo se permitirá una variación de pendiente longitudinal con un grado máximo de variación de 0.3 % por cada 30 m con un grado mínimo de curvatura de 10000 m. En cuanto a la resistencia del terreno, deberá ser mayor que la de la franja y márgenes laterales, pues ésta zona podría soportar las cargas debidas a aviones con mayor frecuencia, sería recomendable que el pavimento de la zona de parada fuera incluso el mismo que el de la pista. Generalmente por razones económicas es de una resistencia menor que el de la pista, pero deberá tenerse en cuenta que su rugosidad siempre deberá ser mayor para poder aumentar su coeficiente de fricción.

2.4 ANCHURAS Y PENDIENTES

El diseño del perfil de la pista se verá afectado por la longitud de la misma ya que una vez determinada la orientación y el sitio donde se va a construir, se tendrá que cumplir con las pendientes permisibles atendiendo a la topografía del terreno, ahora bien, como la pendiente efectiva puede dificultar el despegue de los aviones según se vió anteriormente, se tendrá que revisar si en la longitud de pista calculada se pueden manejar las pendientes longitudinales de manera que no provoquen limitaciones a los aviones, pero en caso de provocarlas habrá que recalcular la longitud de pista hasta conciliar los dos factores. El diseño del perfil longitudinal se basa en 2 conceptos que se conocen como " distancia visible " y el " perfil propio " .

DISTANCIA VISIBLE.

El factor que puede reducir la distancia a la que se tiene visibilidad a lo largo de la pista es el cambio de pendientes, la O.A.C.I. recomienda que cuando no pueda evitarse un cambio de pendiente, el cambio debe ser tal que no obstruya una línea de visión, desde cualquier punto situado a:

3 m por encima de una pista deberá ser visible cualquier otro punto situado también a 3 m por encima de la pista dentro de una distancia igual o por lo menos a la mitad de la longitud de la pista cuando la letra de clave sea C, D o E.

2 m por encima de una pista deberá ser visible cualquier otro punto situado también a 2 m por

encima de la pista, dentro de una distancia igual o por lo menos a la mitad de la longitud de pista cuando la letra de clave sea B.

1.5 m por encima de una pista deberá ser visible cualquier otro punto situado también a 1.5 m por encima de la pista, dentro de una distancia igual o por lo menos a la mitad de la longitud de pista cuando la letra de clave sea A.

La F.A.A. no impone condiciones para distancia visible en aeropuertos con torre de control, pero sus normas de pendientes longitudinales prevén una línea de visión adecuada.

PERFIL LONGITUDINAL

Respecto al perfil longitudinal de la pista, deberán minimizarse los cambios de pendiente hasta donde sea posible, sin embargo, una sola pendiente longitudinal sería antieconómica, por lo tanto la O.A.C.I. y la F.A.A. permiten cambios de pendiente pero limitando su número y la diferencia de pendientes en los puntos de transición, estos cambios o transiciones se llevan a cabo mediante curvas verticales.

La longitud de estas curvas viene determinada por la magnitud del cambio de pendiente y el máximo cambio de pendiente permisible por cada 30 m de pista, ambos valores aparecen en las tablas siguientes.

Pavimento				Área de seguridad		
Pendiente longitudinal máxima	Gradiente efectivo máximo	Cambio de pend. longitudinal máxima	Cambio de pendiente por cada 30m	Pendiente transversal máxima	Pendiente longitudinal máxima	Pendiente transversal máxima
1.25	1.0	1.5	0.1	1.5	1.5	2.5
1.25	1.0	1.5	0.1	1.5	1.75	2.5
1.5	1.0	1.5	0.2	1.5	2.0	2.5
2.0	2.0	2.0	0.4	2.0	2.0	3.0
2.0	2.0	2.0	0.4	2.0	2.0	3.0

Las especificaciones anteriores corresponden en orden descendente a aeropuertos de categoría E, D, C, B y A respectivamente.

ref. "Anexo 14", vol. 1.

O.A.C.I.

Las pendientes longitudinales obtenidas al dividir la diferencia entre la elevación máxima y la mínima a lo largo del eje de la pista, por su longitud, no deberá exceder del:

1% cuando el número de clave sea 3 o 4

2% cuando el número de clave sea 1 o 2

En ninguna parte de la pista la pendiente longitudinal debería exceder del:

1.25% cuando el número de clave sea 4, excepto en el primero y el último cuarto de la longitud de la pista, en los cuartos intermedios la pendiente no deberá exceder del 0.8%.

1.5% cuando el número de clave sea 3, excepto en el primero y último cuartos de la longitud de pista para aproximaciones de precisión de categoría II o III, en los cuales la pendiente no deberá exceder del 0.8% y 2% cuando el número de clave sea 1 o 2.

Cuando no se pueda evitar un cambio de pendiente entre 2 consecutivas, éste no deberá exceder del:

1.5% cuando el número de clave sea 3 o 4

2 % cuando el número de clave sea 1 o 2

La transición de una pendiente a otra deberá efectuarse por medio de una superficie curva con un grado de variación que no exceda de:

0.1% por cada 30 m (radio mín de curvatura = 30000 m)

cuando el número de clave sea 4

0.2% por cada 30 m (radio mín de curvatura = 15000 m)

cuando el número de clave sea 3

0.4% por cada 30 m (radio mín de curvatura = 7500 m)

cuando el número de clave sea 1 o 2

La distancia entre los puntos de intersección de 2 curvas sucesivas no debería ser menor que la suma de los valores numéricos absolutos de los cambios de pendiente correspondientes, multiplicada por el valor que corresponda entre los siguientes:

30000 m cuando el número de clave sea 4

15000 m cuando el número de clave sea 3

5000 m cuando el número de clave sea 1 o 2

se escogerá la distancia mayor.

Ejemplo de determinación de una longitud "D" entre cambios de pendiente según las recomendaciones anteriores:

Datos:

Pista (Número de clave 3)

Pendiente :

X = 0.01

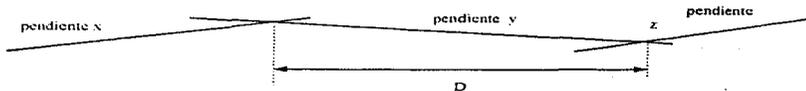
Y = -0.005

Z = 0.005

$$D = 15000 (|x-y| + |y-z|)$$

$$D = 15000 (|0.01 + 0.005| + | -0.005 - 0.005 |)$$

$$D = 375 \text{ m}$$



PENDIENTES TRANSVERSALES.

Para facilitar la rápida evacuación del agua la superficie de la pista deberá tener pendiente adecuada para el escurrimiento en dos direcciones, excepto los casos en que haya pendiente transversal única que descienda en la dirección del viento que acompaña la lluvia con mayor frecuencia. la pendiente transversal será:

1.5 % para aeropuertos C, D ó E.

2 % para aeropuertos A ó B.

Puede disminuirse dicha pendiente en las intersecciones pero nunca será menor de 1 %, el correcto drenaje evitará problemas de hidroplaneo.

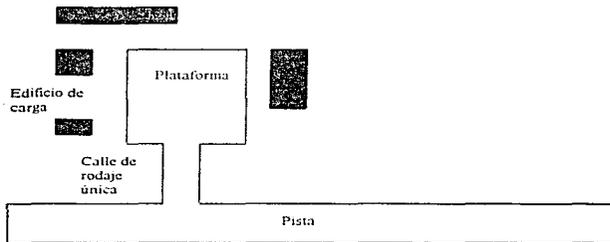
CAPÍTULO 3. CALLES DE RODAJE.

3.1 NECESIDAD DE LAS CALLES DE RODAJE.

Las calles de rodaje tienen la función de permitir el acceso desde la pista hasta cualquier otro sitio del aeropuerto como : los edificios , las plataformas de estacionamiento , hangares etc. de ... forma más rápida y segura . Deben diseñarse de manera que los aviones que abandonen la pista no interfieran con los aviones que se encuentran en rodaje o a punto de despegar , respecto a esto se debe hacer énfasis en que cualquier interferencia por mínima que sea ocasionará retrasos en las maniobras de abandono y toma de pistas que al ser acumulativas podrían incluso disminuir la capacidad de las pistas , es decir , reducir el número de operaciones por hora que pueden manejar , afectando así la capacidad total del aeropuerto.

Las pistas y calles de rodaje son los elementos menos flexibles para su ubicación dentro del proyecto geométrico de un aeropuerto , ya que la ubicación de las pistas , que regirá prácticamente todo el proyecto dependerá en primer término de la dirección de los vientos dominantes (vease cap. 2.1) y en segundo término de las limitaciones que representen los obstáculos adyacentes al aeropuerto , ya sean naturales o producto del desarrollo urbano (vease cap. 1.3) y por lo tanto , las calles de rodaje (entradas , salidas y circulaciones) tendrán una ubicación casi obligada por la posición de las pistas , el tipo de aviones que operarán y las plataformas que a su vez estarán en función de las posibilidades de ubicación de los edificios de pasajeros y carga dentro del terreno del aeropuerto . En cuanto a su número , siempre será preferible la existencia de calles de rodaje suficientes de manera que se utilicen en una sola dirección , ya sea para tomar pista o

abandonarla . En muchos aeropuertos las calles de rodaje forman ángulos rectos con las pistas . en este caso el avión después de aterrizar estará obligado a desacelerar casi hasta detenerse antes de poder girar para abandonar la pista , e inclusive tendría que regresar sobre la misma pista para salir si no se tuvieran calles de rodaje en ambas cabeceras de pista y se invirtiera el sentido común de las operaciones por razones de viento , provocando así un tiempo de ocupación de pista de hasta 10 min. (observación personal hecha en el aeropuerto de "Pie de la Cuesta" , F.A.M. , Acapulco, Gro. La configuración general de este aeropuerto se muestra a continuación)



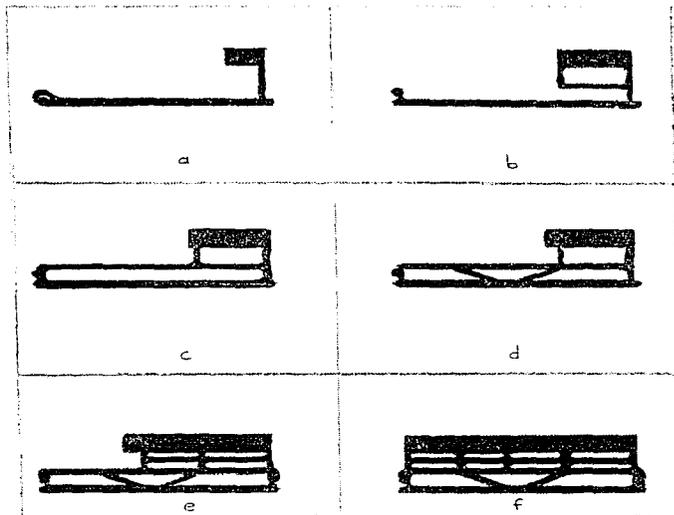
Dicha disposición geométrica no es mala para aeropuertos pequeños en los cuales se podría lograr grandes aumentos en la capacidad con mejoras simples como una calle de rodaje en ambos extremos de pista o un retorno hacia una calle paralela a la pista , que conducirá a la calle de rodaje principal o a la plataforma. Aún así , existen aeropuertos para la aviación general o comerciales en su primer etapa de desarrollo , que por el volumen de tránsito que operan no necesitan más que una calle de rodaje , por lo

que su sistema de calles solo se desarrollará cuando el incremento en las operaciones lo justifique.

La O.A.C.I. considera que para aeropuertos con intensidad de tránsito mayor de 25 operaciones/hora es recomendable que las calles de salida de pista formen ángulos agudos con la pista para que los aviones que aterrizan puedan abandonarla aún sin desacelerar totalmente, reduciendo así su tiempo de ocupación de pista y por lo tanto aumentando la capacidad de la misma. Este tipo específico de calles se conoce también como calles de desvío o de salida rápida.

Por otra parte, durante la planificación del desarrollo futuro de la zona aeroportuaria debe ya haberse estimado el aumento de demanda del transporte aéreo que se reflejará en un mayor número de operaciones y posiblemente en la futura utilización del aeropuerto por aviones de mayores dimensiones, lo que impondrá al diseño otra restricción, que es la facilidad para poder integrar las calles de rodaje de una primera etapa al sistema de calles de etapas futuras hasta llegar al desarrollo total estimado. De manera tal que será preferible proyectar el sistema de calles de rodaje en su totalidad desde el principio considerando el desarrollo que pueda tener el aeropuerto hasta su punto de operación máxima. Por lo tanto, las calles de rodaje que se construyan deben ser parte del sistema total a desarrollar, y no producto de diseños aislados.

A continuación se muestra gráficamente el posible desarrollo por etapas de un sistema de calles de rodaje en un aeropuerto. Pueden apreciarse mejoras simples para alcanzar la capacidad requerida hasta la etapa "c", después la necesidad de calles de salida rápida en "d" y finalmente un sistema más complicado de calles paralelas para minimizar los recorridos y las interferencias en rodaje. Puede verse también que la configuración en "f" no podría lograrse o se haría con mayores costos si no se proyectara el sistema total antes de la construcción para la etapa "a".

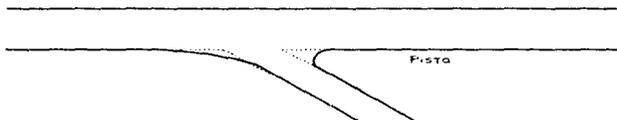


Como podemos ver, el diseño de las calles de rodaje está afectado por múltiples factores de tipo aerodinámico, de topografía y ubicación del terreno, posición de instalaciones, y otras consideraciones como las que se mencionan a continuación.

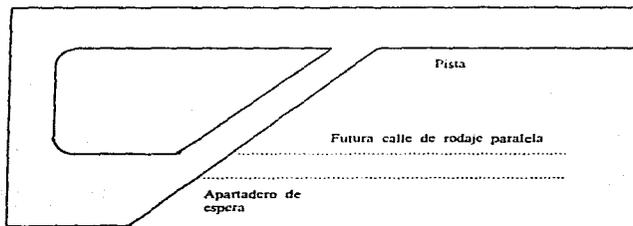
El trayecto descrito por las calles de rodaje deberá comunicar los diferentes elementos del aeropuerto utilizando las distancias más cortas posibles para reducir al mínimo los tiempos y costos en rodaje. Además deberá ser sencillo para

evitar confundir al piloto y disminuir la complejidad de las instrucciones que reciba de la torre de control.

Siempre que sea posible deberán manejarse tramos rectos de calle de rodaje y de ser necesarios los cambios de dirección se harán mediante curvas con radios amplios y superficies de enlace o calles más anchas con la finalidad de permitir el rodaje de los aviones a la máxima velocidad posible.



Es recomendable por seguridad y reducción de tiempo de obstrucción que las calles de rodaje no se crucen con pistas ni con otras calles de rodaje, para cumplir con esto último puede ser necesaria la construcción de calles de desvío y apartaderos de espera.



El trayecto de rodaje deberá prever que ni los aviones en rodaje ni los vehículos terrestres en circulación puedan interferir con las señales luminosas o de radio de las ayudas para la navegación, ya que los aviones en rodaje o parados pueden interferir con las señales del I.L.S. (anexo 10 , adjunto C , O.A.C.I.)

Todas las calles de rodaje del sistema deberán ser visibles desde la torre de control del aeropuerto y en caso de tener zonas ocultas por alguna instalación , la torre de control deberá tener visibilidad mediante cámaras de televisión .

Deberán prevenirse los efectos del chorro de gases procedente de los motores de reacción en las áreas adyacentes a las calles de rodaje , estabilizando los suelos sin cohesión e instalando si es necesario barreras , para proteger las instalaciones y al personal del aeropuerto que eventualmente pase .

Se han hecho investigaciones que muestran que cuando un avión completamente cargado rueda cubriendo una distancia de 3 a 7 km (según el tipo de avión , tamaño , tipo de neumáticos y la temperatura ambiente) , la temperatura de la carcasa de los neumáticos durante el despegue puede exceder el valor crítico de 120 grados centígrados (que es el límite estándar que utiliza la industria llantera) , que al ser sobrepasado , podría provocar una alteración en la resistencia de los cordones de nailón y en la propiedad de adhesión del caucho de los neumáticos , con lo que aumenta importantemente la probabilidad de rotura de algún neumático . Por lo que se debe procurar en el diseño del sistema de calles , que el recorrido de rodaje previo al despegue sea lo más corto posible , ya que en ese lapso los neumáticos soportarán los pesos máximos y por lo tanto existe más riesgo de que un neumático se reviente .

Este último es un factor de gran importancia ya que aún cuando la rotura de algún neumático durante el despegue no provocará un desastre con grandes daños para el avión y sus ocupantes, interrumpirá la operación, y la imposibilidad de frenar con el neumático reventado podría causar una salida de pista.

Por lo anterior se recomienda un recorrido máximo permisible de 5 km para aviones de fuselaje ancho pero aún dicha distancia debe reducirse si durante el recorrido debe efectuar varios giros y frenajes, ya que las fricciones acumuladas que provocan podrían llegar a ser importantes. Otro factor que nos permite hacer más seguro el diseño de las calles de rodaje, es la diferencia de peso de los aviones antes de despegar y los que están en rodaje después de aterrizar, debido a que en el último caso la presión en las llantas por efecto del peso disminuiría y se podría entonces dar un mayor recorrido de rodaje para los aviones que aterrizan, con la intención de reducir el trayecto de rodaje previo al despegue.

El adecuado emplazamiento de calles de salida rápida reducirá también significativamente el recorrido del avión en la pista, que además del beneficio económico-operacional que es su razón de ser, reducirá la fricción y calentamiento de los neumáticos por recorrido en pista, lo que posibilitará un pequeño incremento en la distancia de rodaje después del aterrizaje y por lo tanto también una posible reducción de la distancia de rodaje antes del despegue.

3.2 TIPOS DE CALLE DE RODAJE.

Las calles de rodaje se diferencian entre sí por la función específica que tienen y por su ubicación dentro de la configuración de la zona aeronáutica, a continuación se describirán los tipos de calles de rodaje, se analizarán sus funciones específicas dentro del sistema total de rodaje y como interfuncionan con otros elementos de la zona aeronáutica.

CALLES DE SALIDA RÁPIDA.

Las calles de salida rápida son aquellas calles de rodaje que se unen a una pista formando un ángulo agudo y están diseñadas de modo que permiten a los aviones que aterrizan virar para abandonar las pistas a velocidades mayores que las que se logran en otras calles de rodaje, reduciendo así el tiempo de ocupación de pista y por lo tanto aumentando su capacidad, lo que convierte a la calle de salida en un complemento funcional de la pista.

La necesidad de diseñar y construir una calle de salida rápida se basa en el análisis de tránsito existente o previsto. Cuando se calcula que la densidad del tránsito esperado es hasta de 25 operaciones (aterrizajes y despegues) por hora, será en general suficiente la calle de salida en ángulo recto que es más económica, y que si se sitúa adecuadamente, garantizará la fluidez del tráfico con pocas demoras.

La O.A.C.I. ha establecido una recomendación única para el diseño de calles de salida rápida, con la ventaja de que los pilotos al familiarizarse con este tipo de configuración pueden conseguir los mismos resultados al aterrizar en diferentes aeropuertos y lograr el perfeccionamiento de estas operaciones con la práctica.

. Los parámetros establecidos hasta la fecha son resultado de múltiples ensayos en situaciones reales y estudios adicionales para determinar la utilización de las calles de rodaje, su emplazamiento, geometría e influencia en la capacidad de la pista, dichos estudios se han llevado a cabo para las diferentes categorías de aviones y con velocidades altas de abandono de pistas.

En realidad existen muchas diferencias en cuanto a las velocidades de salida de pistas ya que dependen de factores diversos que difícilmente se podrían homogeneizar, así que el rango de velocidades de salida se ha tomado de la observación directa de las operaciones. Se ha visto que en la mayoría de los casos las velocidades de salida no son superiores a los 46 km/h (25 nudos) e incluso algunas veces son inferiores cuando existen malas condiciones de frenado o vientos laterales que hacen al piloto ser más cauteloso, sin embargo, en algunos aeropuertos ha habido casos en que los aviones abandonan la pista a velocidades cercanas a 92 km/h (49 nudos) en condiciones de pista seca, de manera que se ha tomado por seguridad una velocidad máxima de referencia de 93 km/h (50 nudos) para determinar los radios de las curvas y la longitud de las partes rectas adyacentes de las calles de salida.

EMPLAZAMIENTO .

El sitio de emplazamiento de las calles de salida en relación con la longitud de la pista está determinado por el régimen de desaceleración de los aviones después de cruzar el umbral y en el toque de ruedas. Para definir dicho régimen habrá que conocer la velocidad del avión en el toque de ruedas y la velocidad de salida o de viraje en el punto de tangencia de la curva central de salida. Para efectos del diseño se supone que los aviones cruzan el umbral a

una velocidad promedio equivalente a 1.3 veces la velocidad de pérdida en la configuración de aterrizaje con la masa de aterrizaje máxima que es en general alrededor del 85 % de la masa total máxima. Así, se agrupan los aviones dependiendo de su velocidad en el umbral en 4 grupos, la velocidad de toque de ruedas será entre 3 y 5 nudos menor.

Grupo	Velocidad en el umbral
A	Menos de 169 km/h (91 nudos)
B	De 169 km/h (91 nudos) a 222 km/h (120 nudos)
C	De 224 km/h (121 nudos) a 259 km/h (140 nudos)
D	De 261 km/h (141 nudos) a 306 km/h (165 nudos)

A continuación se muestra la clasificación de los aviones más comunes dentro de sus grupos de velocidad en el umbral. (Manual de diseño de aeródromos, parte 2, O A C I)

GRUPO A: Convair 240

DC-3
DHC6
DHC7

GRUPO B: Convair 500

DC-4
DC-6
DC-7
FOKKER F27
FOKKER F28
HS 146
HS 748
IL18
IL76

GRUPO C: AIRBUS (A300 , A310)	GRUPO D: B-747
B-707-320	DC-8 (61y 63)
B-727	DC10-30-40
B-737	IL62
B-747-SP	IL86
B-757	L1011-500
B-767	TU-134
DC-8	TU-154
DC-9	
DC10-10	
L1011-200	
TRIDENT 1y2	

De la distinción anterior entre grupos, podemos ver que el número de calles de salida dependerá del tipo y número de aviones que efectúan maniobras durante el período de mayor intensidad de movimientos, por lo que en el caso de un aeropuerto muy grande en el que la mayoría de los aviones pertenecerán a los grupos C y D, es posible que se necesiten solo 2 salidas a lo largo de la pista. Esto debido a que los aviones de cada grupo requerirán una calle de salida a determinada distancia del umbral de la pista a lo largo de la cual podrán desacelerar lo suficiente para llevar a cabo la salida con una velocidad segura. En el caso de que la misma pista recibiera operaciones de los 4 grupos necesitaría 4 salidas.

Lo anterior demuestra la conveniencia de proyectar 2 pistas, una para operar aviones LTOL y la otra para operaciones STOL como se mencionó en el capítulo anterior, ya que al dividir el tipo de operaciones, cada pista tendría mayor capacidad. Además el sistema de calles de rodaje sería más sencillo ya que en realidad el aeropuerto funcionaría como 2 aeropuertos especializados, lo que permitiría incluso una

optimización en los servicios a los aviones en tierra y de los movimientos de carga y descarga.

Ahora bien, la pista STOL podría ser en realidad una primera etapa para una pista LTOL, de manera que su diseño y construcción deberá integrarse desde el principio en el plan maestro de desarrollo y prevenir las zonas que requerirán dichas modificaciones en la zona aeronáutica.

Adicionalmente a las calles de salida rápida principales podrían ser necesarias calles de salida adicionales en caso de pistas demasiado largas. Se recomienda situarlas con intervalos de 450 a 600 m a partir del extremo de pista. A continuación, se muestra una tabla de utilización acumulada de salidas rápidas y la distancia a que están situadas desde el umbral de la pista en metros.

Categoría de aeronave	Porcentaje de utilización acumulada						
	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %	100 %
A	1170	1320	1440	1600	1950	2200	2900
B	1370	1480	1590	1770	2070	2300	3000
C	1740	1850	1970	2150	2340	2670	3100
D	2040	2190	2290	2480	2750	2950	4000

En cuanto al trazo, la O.A.C.I. especifica que para pistas con número de clave 3 o 4, la señal de eje de la calle de rodaje comienza al menos a 60 m del punto de tangencia de la curva central de la calle de salida y se desvía 0,9 m para permitir al piloto del avión reconocer el comienzo de la curva, para pistas de clave 1 o 2 la señal del eje de la calle de rodaje comienza al menos a 30 m desde el punto de tangencia de la curva central de salida. A continuación se muestran los trazos característicos de calles de salida conforme a las especificaciones del anexo 14.

optimización en los servicios a los aviones en tierra y de los movimientos de carga y descarga.

Ahora bien, la pista STOL podría ser en realidad una primera etapa para una pista LTOL, de manera que su diseño y construcción deberá integrarse desde el principio en el plan maestro de desarrollo y prevenir las zonas que requerirán dichas modificaciones en la zona aeronáutica.

Adicionalmente a las calles de salida rápida principales podrían ser necesarias calles de salida adicionales en caso de pistas demasiado largas. Se recomienda situarlas con intervalos de 450 a 600 m a partir del extremo de pista. A continuación, se muestra una tabla de utilización acumulada de salidas rápidas y la distancia a que están situadas desde el umbral de la pista en metros.

Categoría de aeronave	Porcentaje de utilización acumulada					
	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
A	1170	1320	1440	1690	1950	2900
B	1370	1480	1590	1770	2070	3090
C	1740	1850	1970	2150	2340	3100
D	2040	2190	2290	2480	2750	4000

En cuanto al trazo, la O.A.C.I. especifica que para pistas con número de clave 3 o 4, la señal de eje de la calle de rodaje comienza al menos a 60 m del punto de tangencia de la curva central de la calle de salida y se desvía 0.9 m para permitir al piloto del avión reconocer el comienzo de la curva, para pistas de clave 1 o 2 la señal del eje de la calle de rodaje comienza al menos a 30 m desde el punto de tangencia de la curva central de salida. A continuación se muestran los trazos característicos de calles de salida conforme a las especificaciones del anexo 14.



Figura 1.7. Tratado de las calles de salida rápida (caso de clave 3 & 4)

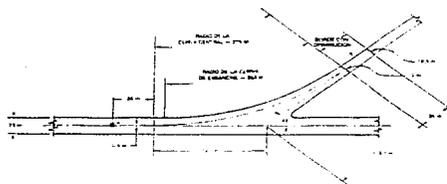


Figura 1.8. Tratado de las calles de salida rápida (caso de clave 1 & 2)

Los radios de curva de viraje deberán ser por lo menos de 550 m cuando el número de clave es 3 o 4 para permitir velocidades de salida con pistas mojadas de 93 km/h (50 nudos) y de 275 m cuando el número de clave es 1 o 2 para permitir velocidades de salida con pistas mojadas de 65 km/h (35 nudos) .

Por último , una calle de rodaje de salida rápida , deberá tener después de la curva de viraje una recta suficiente para un avión que estuviese saliendo pudiera detenerse totalmente antes de llegar a alguna intersección con otra calle de

rodaje, y su longitud no debe ser menor de 35 m para aeropuertos de clave 3 ó 4. Cuando el ángulo de intersección entre la calle de salida de la pista es de 30°, estas distancias se calcularán con regimenes de desaceleración de 0.76 m/s² en la curva de viraje y 1.52 m/s² en la recta, la experiencia ha demostrado que el ángulo óptimo de intersección es de 30° pero puede variar, conforme a la reglamentación entre los 25° y los 40°.

CALLES DE RODAJE PARALELAS.

Las calles de rodaje paralelas son esenciales cuando durante las primeras etapas del desarrollo aeroportuario la pista no cuenta con calles de salida rápida, debido a que en esas condiciones la calle paralela a la pista comunicada con ambas cabéceras será la solución ideal para las maniobras de toma y abandono de pista sin provocar grandes demoras. (vease 3.1, la fig. sobre etapas de la ampliación de un sistema de calles de rodaje, observe etapa C)

En las etapas posteriores cambiará su funcionalidad pero no disminuirá su importancia, ya que serán, el punto del sistema de calles de rodaje en el que los aviones deben haberse detenido totalmente y por lo tanto servirán de conexión entre las calles de salida rápida y las calles que les permitirán llegar a la plataforma.

Una vez alcanzado el desarrollo máximo del aeropuerto, las calles paralelas serán esenciales ya que reducirán los trayectos hacia la plataforma, proporcionarán a los controladores de la torre más posibles combinaciones para recorridos desde la plataforma hacia la pista y viceversa. Lo que les permitirá agilizar las maniobras e inclusive pueden servir como apartaderos de espera momentáneamente.

CALLES DE RODAJE EN PUENTES.

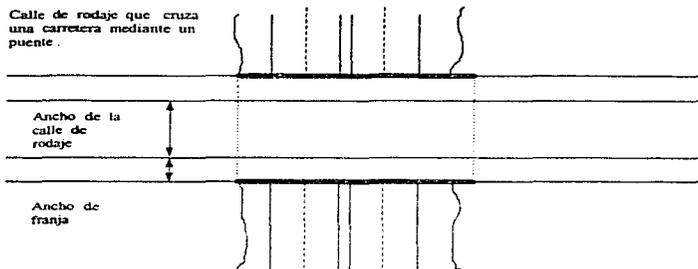
Quando el diseño de un aeropuerto, sus dimensiones o su sistema de calles de rodaje exiga el tener que cruzar con dichas calles los trayectos de carreteras, vías férreas o sobre alguna fuerte depresión del terreno, se tendrá la necesidad de construir puentes de rodaje, y su diseño debe ser tal que las operaciones de los aviones se realicen sin limitaciones tanto de día como de noche, y en cualquier tipo de condiciones atmosféricas como lluvias, nevadas, ráfagas de viento etc.

En cuanto a su emplazamiento, si es necesario construirlo, deberemos tomar en cuenta que a fin de alinearse correctamente, el puente deberá ubicarse en medio de un tramo recto de la calle de rodaje y no deberán emplazarse calles de salida rápida en puentes.

El ancho de los puentes deberá ser por lo menos igual al ancho de la parte nivelada de la franja de la calle de rodaje, es decir, el ancho del pavimento más los márgenes de la calle de rodaje de la cual va a ser complemento, por lo tanto los requisitos de anchura mínima son:

letra de clavo	ancho (m)
A	22
B o C	25
C	38
D	44

Calle de rodaje que cruza una carretera mediante un puente.



En el caso extremo en que un giro deba realizarse sobre un puente, deberá diseñarse el puente con un ancho mayor que compense el movimiento asimétrico del avión debido a la desviación de las ruedas del tren principal respecto al eje de la calle, como se explicó anteriormente.

Además de una correcta alineación, el hecho de situarlo entre 2 tramos rectos le dará una mayor capacidad y rango de seguridad que en el caso de estar antecedido o precedido por una curva, se recomienda que la longitud de los tramos rectos adyacentes debe ser por lo menos del doble de la longitud de referencia del avión más grande de la que se prevea que servirá el aeropuerto y en ningún caso los tramos rectos podrán ser menores de:

Clave	Longitud de tramos rectos (m)
A	15
B	20
C, D o E	50

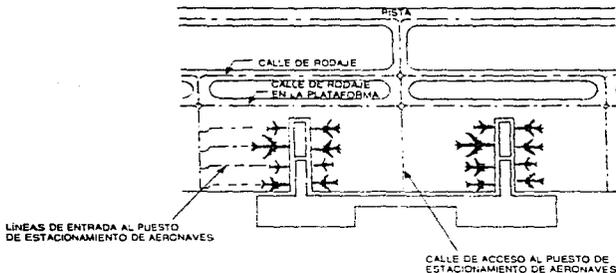
Se espera que los aviones futuros de clase E tengan una distancia entre tren principal y tren de proa de hasta 35 m con lo que los tramos rectos tendrian que ser de por lo menos 70 m. las pendientes de calles de rodaje sobre puentes deben proporcionar continuidad a las de las calles adyacentes y por lo tanto serán las pendientes especificadas para calles de rodaje que se tabularán más adelante.

En los puentes deberá construirse una contención lateral como medida de seguridad que proteja los bordes laterales del puente para que los aviones no se salgan del mismo. Este dispositivo consiste generalmente en un bordillo de concreto que sirve de barrera y que es similar a una guarnición de banqueta. suele tener una altura entre 20 cm y 60 cm. Se acostumbra bordillos de poca altura cuando el ancho de la superficie del puente es apreciablemente mayor que el de la franja de la calle de rodaje.

Aunque algunos puentes de este tipo llevan más de 25 años funcionando y nunca se ha presentado un caso de salida de puente, la construcción del bordillo es necesaria, además es recomendable también que sobre dicho bordillo se coloque una maya de alambre de baja altura a manera de barandal para proteger a los vehiculos y personas que pasan bajo el puente del chorro de los motores.

CALLES DE RODAJE EN PLATAFORMA.

Las calles de rodaje situadas en plataformas, son calles destinadas a proporcionar un trayecto directo para el rodaje a través de la plataforma o para tener acceso a un puesto de estacionamiento, por lo que físicamente quedarán incluidas en las plataformas aumentando las dimensiones de estas.



Las dimensiones de las calles de rodaje estarán determinadas por el tamaño de los aviones, por lo que la O.A.C.I. ha especificado dimensiones en función de la categoría de los aviones, de manera que el dimensionamiento del sistema de calles se realizará para el avión más grande de la flota.

Un factor importante que debe considerarse para el diseño de curvas e intersecciones, es la facilidad de giro del tren de proa de cada tipo de avión, que se conoce como ángulo de guía admisible del avión, en la siguiente tabla aparecen los ángulos de guía de los aviones más representativos de su clase.

Modelo de la aeronave	Ángulo de guía máximo	Ángulo de guía aproximado durante un viraje de 180°
Lear 55	55°	40°
F28-2000	76°	45°
MD80	82°	65°
Concorde	60°	85°
MD11	70°	60°
B-747	70°	50°

Fuente: Doc. 9157, parte 2, O.A.C.I

Las diferencias entre los ángulos de guía admisibles para cada tipo de avión, así como de las distancias que tienen entre el tren de aterrizaje principal y el tren de proa (longitud de referencia del avión), provocan la necesidad de verificar que todos los aviones que se espera operar en el aeropuerto, puedan realizar giros dentro del sistema de calles. Pues existen aviones con limitaciones que se deben tener presentes para lograr un diseño de calles de rodaje verdaderamente eficiente. Por ejemplo, en el caso del Concorde, podemos ver que el ángulo de guía del tren de proa que necesita para mantener la cabina de pilotaje sobre el eje de la calle de rodaje es de 85° mientras que el ángulo de guía máximo que puede proporcionar el tren de proa es solo de 60° , por lo tanto, la trayectoria del avión se hallaría fuera del eje de la calle de rodaje.

De lo anterior se tiene que para aeropuertos donde se fueran a llevar a cabo operaciones del Concorde u otros aviones con grandes longitudes de referencia, será necesario un estudio aeronáutico preciso para definir la configuración geométrica y dimensiones de las intersecciones de las calles de rodaje.

ESTUDIO AERONÁUTICO.

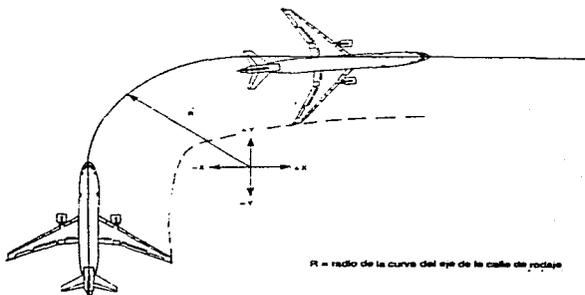
El objetivo principal de un estudio aeronáutico es evaluar el grado de protección que ofrece la configuración de un aeropuerto existente para las operaciones de aviones críticos, o bien previendo los aviones críticos que pudieran utilizar el aeropuerto en el futuro. Los principales peligros hacia cuya prevención estará orientado el estudio, son los relacionados a la colisión entre aeronaves, con vehículos terrestres u objetos en general y el desplazamiento del avión fuera de las superficies pavimentadas y los posibles daños en los motores de los aviones debido a la ingestión de objetos

Los resultados obtenidos de estos estudios proporcionarán la información necesaria para establecer, por ejemplo, las limitaciones para esos casos críticos relacionados con la distancias requeridas entre ejes de pista y calles de rodaje, entre ejes de calles, radios mínimos de curvatura etc. lo que nos permitirá mejorar algún diseño anterior o hacer útil la infraestructura de un aeropuerto para operaciones de aviones mayores.

La experiencia práctica de operaciones de aviones grandes en aeropuertos cuyo diseño no corresponde a las especificaciones que requiere algún tipo de avión en particular, ha demostrado que es posible lograr un funcionamiento seguro y regular mediante la adopción de medidas específicas como la utilización de trayectos de rodaje seleccionados para un tipo especial de avión, la ampliación del ancho de curvas, designación de plataformas más accesibles solo para aviones mayores etc.

Una vez determinadas las dimensiones necesarias para servir a los aviones, el estudio evaluará también la visibilidad de las líneas de guía, señales, luces, letreros, rugosidad de los pavimentos y estado general de la infraestructura, la importancia de la visibilidad de la guía y los anchos adecuados se manifiesta sobre todo en el caso de los pilotos de los aviones de gran tamaño como el B-747, B-767 y el MD-11 quienes al no poder ver el extremo de las alas, tienen que confiar totalmente en las líneas de guía, que de ser seguidas con exactitud, deben de garantizar la distancia libre desde extremo del ala hasta cualquier obstáculo. A continuación aparecen las coordenadas del recorrido del extremo del ala referido a un sistema de coordenadas cartesianas de un avión B-747-400 que formaría parte de un estudio aeronáutico.

Esquema de un viraje de 90° para el cual se realiza el cálculo del recorrido del extremo de ala interior del B-747-400 (en metros)



R = radio de la curva del eje de la cola del rodaje

Radio 30 m				Radio 50 m				Radio 70 m			
Punto de inicio		Extremo de ala		Punto de inicio		Extremo de ala		Punto de inicio		Extremo de ala	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
-30.0	0.0	0.0	-30.0	-50.0	0.0	-17.0	-40.0	-70.0	0.0	-27.0	-40.0
-17.5	5.2	2.2	-42.5	-49.2	9.7	-17.9	-37.5	-66.9	17.2	-38.0	-34.1
-28.2	13.0	5	-36.8	-47.0	17.1	-18.8	-30.9	-60.9	25.9	-39.0	-24.8
-29.0	15.0	0.5	-34.0	-40.3	23.0	-18.9	-25.6	-60.9	33.3	-39.7	-18.8
-23.0	19.0	-0.7	-31.7	-38.3	28.1	-21.0	-20.8	-59.6	43.0	-40.1	-9.0
-11.3	27.0	-2.2	-30.0	-32.1	38.3	-22.0	-18.6	-55.0	53.6	-39.7	-1.8
-19.0	26.0	-1.5	-29.6	-29.0	43.3	-25.8	-12.3	-35.0	60.8	-38.6	3.1
-10.0	27.2	-0.1	-27.2	-17.1	47.0	-23.0	-6.8	-23.0	63.8	-38.6	11.6
-5.2	29.0	-7.8	-26.1	-6.7	49.2	-25.4	-4.4	-12.2	67.9	-33.7	17.8
0.0	30.0	-10.1	-24.8	0.0	50.0	-22.0	-0.6	0.0	70.0	-29.9	23.1
5.2	30.0	-11.7	-23.0	9.7	50.0	-21.4	3.2	8.1	70.0	-17.3	23.8
25.9	30.0	-8.9	-18.6	17.9	50.0	-17.4	8.6	12.2	70.0	-22.8	27.8
15.7	30.0	-11.5	-18.8	25.2	50.0	-11.8	8.3	16.3	70.0	-19.9	29.5
31.4	30.0	-8	-12.5	34.8	50.0	-6.3	11.5	24.4	70.0	-12.3	31.0
28.2	30.0	-7.5	-14.3	42.6	50.0	0.0	13.1	30.3	70.0	-10.4	30.3
31.4	30.0	-8	-12.5	54.2	50.0	8.7	14.3	30.7	70.0	-6.2	33.3
36.7	30.0	-1.2	-10.9	61.1	50.0	17.7	15.8	42.8	70.0	0.2	34.1
41.9	30.0	2.8	-8.5	68.6	50.0	29.9	13.8	48.9	70.0	5.7	34.8
47.1	30.0	6.7	-6.3	75.5	50.0	34.2	16.8	55.9	70.0	11.4	34.4
52.4	30.0	11.0	-7.3					61.1	70.0	17.2	36.8
57.6	30.0	15.5	-4.5					67.2	70.0	22.0	36.1
62.8	30.0	19.2	-5.8					73.3	70.0	28.8	36.4
68.1	30.0	23.8	-3.2					79.4	70.0	34.8	36.8
73.3	30.0	29.6	-4.7								
78.5	30.0	34.7	-3								

- A = inicio de RF rodaje

- B = inicio de maniobra con 14.4° de inclinación de la pista

Mediante el estudio de las trayectorias como la del caso anterior, podrán definirse para cada aeropuerto en particular los anchos y separaciones de las calles de rodaje en todo su recorrido desde las salidas de pista hasta las plataformas.

La experiencia recomienda que la distancia mínima de seguridad que debe haber desde las ruedas del tren de aterrizaje principal hasta el borde del pavimento sea de 4.5 m para aeropuertos de clase E, por lo tanto el ancho de las calles debe incluir por lo menos los 9 m por este concepto más el ancho de vía del avión mayor que la utilizará. En curvas e intersecciones deberán determinarse las trayectorias de las ruedas del tren de aterrizaje principal considerando los métodos operacionales que los pilotos utilizan para seguir las líneas de guía y una vez determinadas adicionar las distancias libres de 4.5 m a cada lado.

Los 4.5 m de ancho libre, se determinaron como resultado de estudios sobre desviación en calles de rodaje efectuados en aeropuertos europeos. Las condiciones del estudio fueron guías bien señaladas y buenas características de fricción de la superficie del pavimento. Se demostró que la desviación media del tren de aterrizaje principal del avión respecto al eje de la calle de rodaje en tramos rectos oscila entre 4 y 4.5 m para aviones de grandes dimensiones. Es importante hacer notar que los vientos fuertes aunados a una pista húmeda pueden provocar desvíos mayores de las trayectorias de rodaje respecto a las guías, por lo que surge la necesidad de acondicionar el suelo aledaño a la calle, formando los márgenes de las calles de rodaje.

MARGENES DE LAS CALLES DE RODAJE.

Los márgenes son zonas adyacentes a la superficie pavimentada que se prepara de forma que proporcione una transición entre el pavimento y el terreno natural. La finalidad que se persigue con su construcción es doble, por una parte, debe proporcionar una resistencia del terreno adecuada en caso de que las ruedas del avión se salieran de la superficie pavimentada y además, evita que los motores de reacción que sobresalen del borde de la calle de rodaje ingierán piedras u otros objetos que puedan producir daños al motor, previniendo también la erosión del área adyacente de la calle de rodaje, por lo que los márgenes de las calles deberían tener un ancho tal que lleguen al menos hasta donde abarcan los motores exteriores de los aviones más grandes que utilicen el aeropuerto.

3.3 ANCHOS Y SEPARACIONES.

Los criterios de diseño de las calles de rodaje en cuanto a dimensiones se refiere son menos estrictos que en las pistas debido a que las velocidades de rodaje son mucho menores que las velocidades en pista. Los cambios de dirección deberán evitarse al máximo y los que se construyan, no deberán ser pronunciados. Dichas curvas se diseñarán considerando que la posición del piloto durante el giro se mantendrá sobre el eje de la curva. En base a esto las anchuras para las calles se integran sumando la distancia entre los bordes exteriores de las llantas del tren principal, conocida como (ancho de vía), más las distancias de seguridad de dichos bordes hasta las orillas del pavimento. Los anchos han sido tabulados en función de la letra de clave del aeropuerto, dicha tabla aparece a continuación.

Tabla 3.3, ANCHURAS, SEPARACIONES Y PENDIENTES DE LAS CALLES DE RODAJE.

Características: Accés	Letra de clave				
	A	B	C	D	E
Anchura mínima de pavimento de la calle de rodaje	7,5 m	10,5 m	18 m ^a 15 m ^b	23 m ^a 18 m ^b	23 m
pavimento y margen de la calle de rodaje	—	—	25 m	38 m	44 m
franja de la calle de rodaje	27 m	39 m	57 m	85 m	93 m
plata elevada de la franja de la calle de rodaje	23 m	—	25 m	38 m	44 m
Distancia libre mínima entre el rueda exterior del tren de aterrizaje principal y el borde de la calle de rodaje	1,5 m	2,25 m	4,5 m ^a 3 m ^b	4,5 m	4,5 m
Separación mínima entre el eje de la calle de rodaje y					
eje de una pista de vuelo por instrumentos					
número de clave					
1	82,5 m	87 m	—	—	—
2	82,5 m	87 m	—	—	—
3	—	—	178 m	178 m	—
4	—	—	—	178 m	182,5 m
eje de una pista que no sea de vuelo por instrumentos					
número de clave					
1	37,5 m	42 m	—	—	—
2	47,5 m	52 m	—	—	—
3	—	—	83 m	101 m	—
4	—	—	—	101 m	107,5 m
eje de calle de rodaje					
obveto	23,75 m	33,5 m	44 m	66,5 m	80 m
calle de rodaje ^a	16,25 m	21,5 m	28 m	40,5 m	47,5 m
calle de acceso al puesto de estacionamiento de aeronaves	12 m	16,5 m	24,5 m	36 m	42,5 m
Pendiente longitudinal máxima de la calle de rodaje					
pavimento	3%	3%	1,5%	1,5%	1,5%
variación de la pendiente	1% por 25 m	1% por 25 m	1% por 30 m	1% por 30 m	1% por 30 m
Pendiente transversal máxima de pavimento de la calle de rodaje					
parte elevada de la franja de la calle de rodaje	2%	2%	1,5%	1,5%	1,5%
pendiente descendente	3%	3%	2,5%	2,5%	2,5%
pendiente ascendente	5%	5%	5%	5%	5%
parte no elevada de la franja					
pendiente ascendente	5%	5%	5%	5%	5%
Raño mínimo de la curva vertical longitudinal	2 500 m	2 500 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m
Alcance visual mínimo en la calle de rodaje	150 m desde una altura de 1,5 m	200 m desde una altura de 2 m	300 m desde una altura de 3 m	300 m desde una altura de 3 m	300 m desde una altura de 3 m

- a Calle de rodaje servida a aeronaves con base de ruedas no 18 m o más.
b Calle de rodaje servida a aeronaves con base de ruedas menor a 18 m.
c Calle de rodaje servida a aeronaves con una anchura total del tren de aterrizaje principal de 3 m o más.
d Calle de rodaje servida a aeronaves con una anchura total del tren de aterrizaje principal inferior a 3 m.
e Calle de rodaje que no sea calle de acceso al puesto de estacionamiento de aeronaves.

Fuente: "Manual de diseño de aeródromos", parte 2, calles de rodaje, O.A.C.I.

En la tabla inferior puede apreciarse como se integran las separaciones entre las calles de rodaje y los demás elementos que aparecen en la tabla anterior. Las separaciones se definieron en base a estudios aeronáuticos y a la probabilidad de accidentes como salidas de pista, pérdida de gobernabilidad del avión en rodaje, etc. De manera que garanticen la seguridad de los aviones ante una posible colisión.

Separación	Letra de clave				
	A	B	C	D	E
Entre eje de calle de rodaje, calle de rodaje en la plataforma y eje de calle de rodaje.					
Envergadura (Y)	15.00	24.00	36	52.0	65.0
= desviación lateral máxima (X)	1.50	2.25	3	4.5	4.5
= incremento (Z)	7.25	7.25	5	10.0	10.5
Separación total (Y)	23.75	33.50	44	66.5	80.0
Entre eje de calle de rodaje y objeto					
1/2 envergadura (Y)	7.50	12.00	18	26.0	32.5
= desviación lateral máxima (X)	1.50	2.25	3	4.5	4.5
= incremento (Z)	7.25	7.25	5	10.0	10.5
Separación total (Y)	16.25	21.50	26	40.5	47.5
Entre eje de calle de rodaje en la plataforma y objeto					
1/2 envergadura (Y)	7.50	12.00	18	26.0	32.5
= desviación lateral máxima (X)	1.50	2.25	3	4.5	4.5
= incremento (Z)	7.25	7.25	5	10.0	10.5
Separación total (Y)	16.25	21.50	26	40.5	47.5
Entre eje de calle de acceso al puesto de estacionamiento de aviones y objeto.					
1/2 envergadura (Y)	7.5	12.00	18.0	26.0	32.5
= desviación del tren de aterrizaje	1.5	1.50	2.0	2.5	2.5
= incremento (Z)	3.0	3.00	4.5	7.5	7.5

Fuente: "Manual de diseño de aerodrómos", parte 2, calles de rodaje, O.A.C.I.

3.4 SUPERFICIES DE ENLACE.

Una vez determinado el trazo y dimensiones de pistas, calles de rodaje y plataformas, deberemos unir sus intersecciones considerando lo dicho anteriormente sobre superficies de enlace.

Las superficies de enlace, son los desarrollos geométricos necesarios para unir mediante curvas suaves las intersecciones entre pistas, calles de rodaje,

calles de salida rápida, plataformas etc. Su diseño depende principalmente de los recorridos que realizarán las ruedas del tren de aterrizaje principal de los aviones sobre el pavimento, ya que en dichas intersecciones se realizarán virajes y debido a la posición de las llantas del tren de aterrizaje habrá desplazamientos de las llantas del tren principal respecto al tren de proa. El tren de proa esta bajo la cabina de pilotaje en la mayoría de los aviones y seguirá el eje de la curva. En el caso de aviones como el "Concorde" en los que el tren de proa se localiza más atrás que la cabina de pilotaje, se considera que la posición del piloto sigue el eje de la curva, por lo que habrá que calcular la diferencia de trayectorias. Una vez que se conoce la trayectoria del tren principal se sumarán las distancias libres que establece la O.A.C.I. en el "anexo 14" y se obtiene así el ancho total de las diferentes secciones del trayecto de rodaje.

Otro concepto que considera la maniobra de los aviones en intersecciones de calles de rodaje esta basado en el desplazamiento de la línea de guía para contrarrestar la desviación del tren principal sin necesidad de construir superficies de enlace. Esta solución es aparentemente la mejor ya que nos evitaria la necesidad de ampliaciones y por lo tanto tendríamos menores costos, sin embargo, tendria que haber entonces una línea de guía distinta para cada tipo de avión y en ambos sentidos de la calle de rodaje si ésta fuera a tener circulación doble, además, haria muy complicado al piloto el poder seguir la línea de guía correspondiente a cada avión por lo que se incrementaria el riesgo de salidas de calles de rodaje simplemente por confusiones.

Un último factor que aunque no es determinante si influye en el desplazamiento lateral del avión es la deformación de las llantas durante el giro, pero este factor no representa dificultades cuando los giros son poco pronunciados o los radios de curvatura son grandes. Para terminar este capítulo se describirán algunos metodos de diseño de superficies de enlace y se realizará un ejemplo de aplicación.

En el capítulo 4 se analizará el diseño de plataformas que es el último elemento de la zona aeronáutica.

MÉTODOS DE DISEÑO DE LAS SUPERFICIES DE ENLACE.

Para poder diseñar las superficies de enlace será necesario establecer la trayectoria del tren de aterrizaje principal, para calcular dicha trayectoria existen 3 métodos, el primero es el de simulación de los movimientos de los aviones utilizando modelos a escala, el segundo método es el de cálculo analítico que está basado en la representación de los movimientos del avión mediante modelos matemáticos y un tercero, conocido como gráfico, que es el más empleado.

El método gráfico consiste en la interpretación de gráficas construidas en base a los resultados de las expresiones matemáticas del método de cálculo, por lo que es en realidad una simplificación del mismo. Los tres tipos de métodos proporcionan una aproximación satisfactoria de la trayectoria seguida por el tren de aterrizaje principal.

A continuación aparece la terminología que se utilizará para poder describir y ejemplificar los métodos gráficos.

PUNTO DE REFERENCIA DEL AVIÓN (S): Es el punto del eje longitudinal del avión que sigue la línea de guía en tierra. El punto de referencia está situado verticalmente debajo del puesto de pilotaje de el avión.

CENTRO DE VIRAJE (P): Centro de viraje de un avión en cualquier momento.

EJE QUE PASA POR EL TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL: Línea perpendicular desde el centro de viraje al eje longitudinal del avión.

LONGITUD DE REFERENCIA (D) : Distancia entre el punto de referencia del avión y el eje que pasa por el tren de aterrizaje principal .

CENTRO DEL TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL (U) : Punto de intersección del eje longitudinal del avión y el eje que pasa por el tren de aterrizaje principal .

ANCHO DE VÍA DEL TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL (T) : Distancia entre las ruedas exteriores principales del avión , incluyendo la anchura de las ruedas .

ÁNGULO DE GUÍA (B) : Angulo formado por la tangente de la línea de guía y el eje longitudinal del avión .

ÁNGULO DE GUÍA DE LA RUEDA DE PROA : Angulo formado por el eje longitudinal del avión y la dirección de la rueda de proa .

LÍNEA DE GUÍA : Línea indicada sobre el pavimento por medio de señales o luces , que el punto de referencia del avión debe seguir durante el rodaje .

CENTRO DE LA LÍNEA DE GUÍA (O) : Centro de curvatura de la línea de guía en el punto (S) .

DESVIACIÓN DEL TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL (λ) : Distancia entre el centro del tren de aterrizaje principal (U) y la línea de guía , medida en sentido perpendicular a esta última .

M = distancia mínima entre las ruedas exteriores del tren de aterrizaje principal y el borde del pavimento .

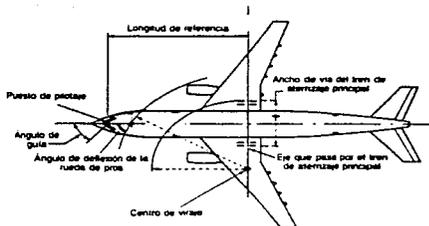
r = Radio del arco de la superficie de enlace .

R = Radio de curvatura de la línea de guía del punto (S) .

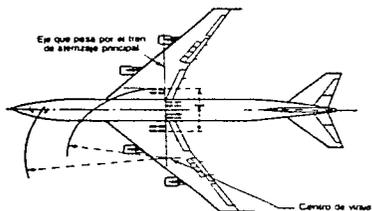
α = Angulo entre la línea radial OU y la tangente a la trayectoria del centro del tren de aterrizaje principal en U .

β = Coordenadas polares de un punto (S) o (U) según sea el caso .

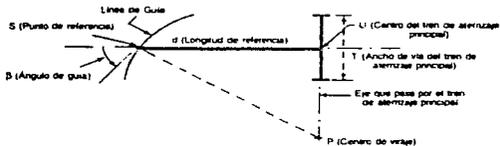
Expresiones y símbolos relativos a los aviones



A. Expresiones — Aeronave con tren de aterrizaje principal de dos patas



B. Expresiones — Aeronave con tren de aterrizaje principal de cuatro patas



En realidad los métodos más bondadosos para el diseño de superficies de enlace son los gráficos, ya que al estar basados en los mismos modelos matemáticos que el método de cálculo, ofrecen resultados con precisión suficiente para lograr un buen diseño sin necesidad de utilizar computadoras, siendo inclusive más rápido el diseño por métodos gráficos cuando se tiene un buen manejo de éstos, por otra parte ofrece casi siempre mayor exactitud que el diseño de superficies mediante modelos sin tener que invertir el tiempo que requiere la construcción de los modelos tanto de aviones como de calles y pistas.

MÉTODO GRÁFICO.

El método gráfico consiste en determinar la superficie de enlace directamente sobre el plano, es recomendable que la escala elegida sea lo suficientemente grande para poder lograr en el dibujo una precisión adecuada, normalmente este plano se construye en etapas sucesivas siendo la primera el trazo de los ejes de las calles de rodaje o pistas que han de conectarse, el siguiente paso será el trazo de los bordes de calles de rodaje y/o pistas cuyos ejes se trazaron previamente, se elijirá el avión que tenga más exigencias dentro de la flota que el aeropuerto servirá, es decir, que se escogerá siempre un avión crítico que será el de mayor ancho entre ruedas del tren principal (ancho de vía) o el de mayor distancia entre el tren principal y el tren de proa (longitud de referencia), una vez escogido se trazará sobre el plano punto por punto de la trayectoria del tren de aterrizaje principal considerando que el tren de proa se mantendrá sobre el eje de calles y pistas, finalmente se trazarán las superficies de enlace adicionando los anchos libres de rodaje que recomienda la O.A.C.I. en su anexo 14 (tabla 3.3 del presente trabajo).

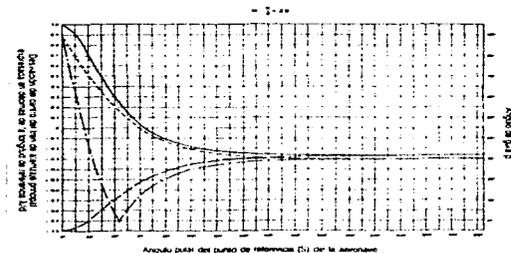
A continuación se diseñará a manera de ejemplo la superficie de enlace necesaria para la intersección entre 2 calles de rodaje a 90°, para lo cual se cuenta con los sig. datos:

	Datos (m)
Radio del eje de la calle de rodaje (R)	36.6
Anchura de la calle de rodaje (X)	23.0
Longitud de referencia del avión crítico (d)	18.3
Ancho de vía del tren de aterrizaje del avión (T)	8.0
Margen de seguridad (M)	4.5

Etapa no.1

De la sig. figura, para $R/d = 2$, obtengase:

- a) El valor del ángulo polar para el punto de referencia (S) al comienzo del viraje, siendo O el correspondiente ángulo de guía (β).



Fuente: Doc 9157, O A.C.1

- b) El valor correspondiente a la desviación del centro del tren de aterrizaje principal expresada en décimas de la longitud de referencia, que da 0.235. A continuación, anótese algunos valores de λ/d y β para una secuencia de ángulos θ_s . (por ejemplo, en incrementos de 20°). Trácese después la línea

de referencia y a continuación distribúyanse los puntos como se indica en la etapa no. 3.

ángulo θ_s	λ/d	β
43°	+0.235	0°
60°	+0.03	13°
80°	-0.11	21°
100°	-0.19	25°
120°	-0.22	27°
133°	-0.24	28°

Etapa no. 2

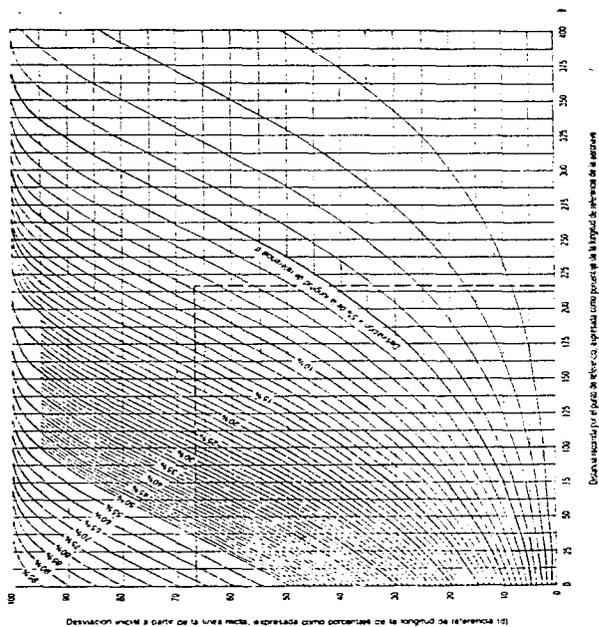
La fig. de la pag. siguiente, permite encontrar valores λ/d para una secuencia de F/d , para la desviación inicial tenemos: $\lambda/d = \text{sen } 28^\circ = 0.47$, por lo tanto tenemos:

λ/d	0.47	0.35	0.25	0.15	0.10	0.05
F/d	0	0.34	0.69	1.21	1.62	2.31



En la foto superior parece el enlace entre la pista, la calle de rodaje y la plataforma del A.I.C.M.

Ángulo de guía (β) y desviación (λ) del centro del tren de aterrizaje principal cuando el punto de referencia (S) recorre una línea recta.



Fuente : Doc 9157, O.A.C.I.

Etapa no. 3

Las curvas pueden trazarse de la manera siguiente:

- a) Trácese una línea de referencia.
- b) Para cada valor de θ s elegido en la etapa no.1, señálese el punto correspondiente de U. Para ello, hállese el punto S sobre la línea de guía, trácese el eje longitudinal del avión con el ángulo de guía correspondiente β y señálese el punto U a una distancia $d = 18.3\text{m}$ a partir de S. Empleando los valores de λ/d de la etapa no.1, compruébese la precisión del trazado.
- c) Donde el punto de referencia S sigue nuevamente una línea recta después de haber salido del viraje, empleando los valores de λ/d y F/d de la etapa no.2, trácese el lugar geométrico del centro del tren de aterrizaje.
- d) Sobre una perpendicular al eje longitudinal del avión trazada desde U, señálese una línea hacia el interior del viraje igual a $(T/2 + M) = 4 + 4.5 = 8.5\text{m}$ por cada posición elegida de U. La línea que pasa por estos puntos es la curva paralela a la trayectoria del centro del tren de aterrizaje principal. Que será el límite mínimo teórico para la superficie de enlace. Si la calle de rodaje pudiera ser utilizada por los aviones en ambos sentidos, trácese la curva del mismo modo en el sentido opuesto.
- e) Elijase un diseño de superficie de enlace que pueda demarcarse fácilmente. Como regla, es preferible seguir un trazado compuesto de secciones rectas y un arco de círculo y un arco de círculo. En este caso específico, un arco con radio de 31.7m es el trazado más fácil.

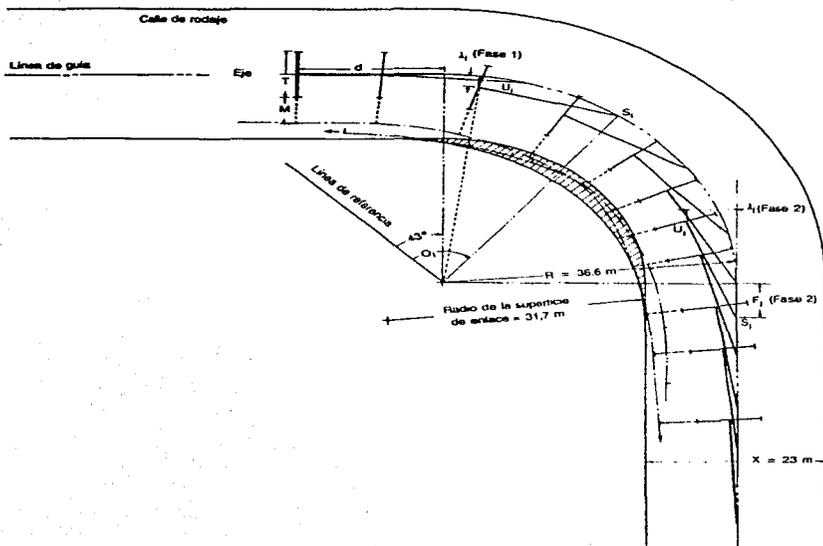
Etapa no.4

Comprobación de la validez del diseño.

- a) La distancia libre debe ser de 4.5m de acuerdo con el mínimo recomendado en el anexo 14, cap.3.
- b) Que el valor máximo (28°) del ángulo de guía sea compatible con los límites operacionales de deflexión de la rueda de proa de todos los aviones que posiblemente utilizaran el aeropuerto.

En la página siguiente, aparece el trazo final de la intersección a 90° que se diseñó en las etapas anteriores. Existen otros métodos para el diseño de superficies de enlace que son el de "arco y tangente" y el de "gráficas de lectura rápida", cuya utilización será a criterio del proyectista, dichos métodos pueden consultarse en el Manual de diseño de aeródromos, parte 2, apéndice 1, doc. 9157, O. A. C. I

Trazo final del diseño ejemplificado



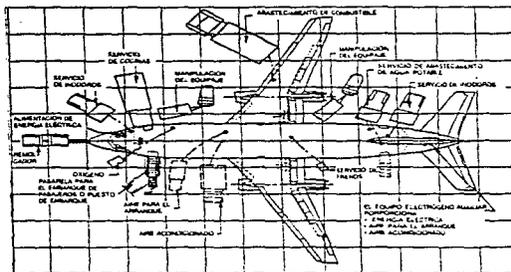
CAPÍTULO 4. ASPECTOS COMPLEMENTARIOS.

4J PLATAFORMAS

Las plataformas son el último elemento dentro de la zona aeronáutica del aeropuerto, y por lo tanto, su diseño deberá permitir una operación óptima en relación con el volumen y dimensiones del tráfico que se pretende manejar. Deberá estar de acuerdo con la capacidad de las pistas y el sistema de calles de rodaje, pues solo mediante la similitud de capacidades entre estos elementos, se podrá lograr un diseño balanceado en cada etapa de desarrollo del aeropuerto que permita una operación eficaz del mismo.

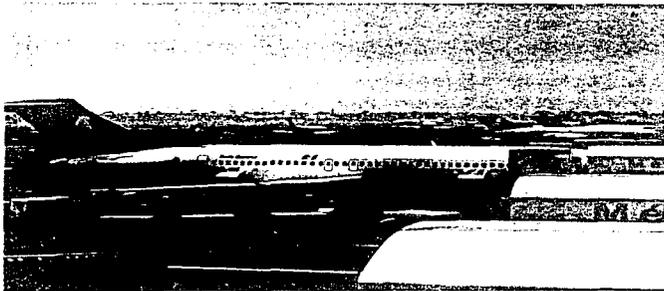
Existen varios tipos de plataforma cuya clasificación depende únicamente del uso al que estarán destinadas dentro de la actividad cotidiana del aeropuerto y dicha actividad determinará su posición dentro de la geometría del mismo. En general, se puede decir que las plataformas son zonas de estacionamiento destinadas a alojar a los aviones después de su rodaje desde las pistas o antes de iniciar el rodaje hacia las mismas. En ellas se llevará a cabo el embarque y desembarque de pasajeros y carga, abastecimiento de combustible, de servicio de cocina, mantenimiento de inodoro, abastecimiento de agua potable, oxígeno, energía eléctrica, aire para el arranque, etc.

La mayoría de éstas funciones se realizan utilizando vehículos especializados que pueden realizar sus maniobras perfectamente dentro del espacio de la propia plataforma. En el siguiente dibujo aparece un modelo de la ubicación del equipo en general.



El dibujo anterior muestra un avión estacionado con la proa hacia el edificio de pasajeros, pero existen varias configuraciones de estacionamiento que debido a las necesidades que generan en relación con la entrada y salida de los aviones, tendrán diferentes requerimientos de área y equipos. Dichas configuraciones y su influencia en el diseño de la plataforma se analizarán más adelante.

La superficie de las plataformas requerirá estar pavimentada, aunque en aeropuertos pequeños para la aviación general puede bastar con el trazo correcto de la zona de plataformas y una superficie de suelo natural compacto o cubierto con pasto.



Plataforma del edificio de pasajeros en el aeropuerto internacional de la Ciudad de México, ALCM.

REQUISITOS DE DISEÑO

El diseño de cada tipo de plataforma exige la evaluación de numerosas características relacionadas entre sí pero con aspectos propios debido a las distintas finalidades de las plataformas. Las características generales de diseño son las relacionadas con la seguridad, eficacia, flexibilidad e ingeniería, que mencionaremos a continuación.

Los aspectos de seguridad implican que al diseñar la plataforma deberán tenerse en cuenta los procedimientos de seguridad relativos a los aviones que realizan operaciones en ellas. Las plataformas deben tener espacio suficiente para que los aviones que operarán mantengan las distancias libres especificadas y sigan los procedimientos establecidos para entrar, desplazarse y salir de ellas.

Los pavimentos deben tener pendientes que impidan que los líquidos que pudieran verse en la plataforma como agua de lluvia o combustible escurran hacia el edificio terminal, los almacenes de servicio etc., además, deberán instalarse tomas de agua para lavar

periódicamente la plataforma, por lo que se instalará al menos una toma por cada puesto de estacionamiento. La plataforma deberá tener también dispositivos de abastecimiento de combustible, conexiones de aire comprimido y sistema eléctrico que pueden colocarse bajo el pavimento y su mantenimiento se hará mediante pozos de visita, o bien, realizar el abastecimiento mediante equipos móviles. La decisión entre la utilización de equipos fijos o móviles dependerá fundamentalmente de la diferencia de costos.

Para lograr la eficacia en las plataformas, el diseño deberá contribuir al fácil movimiento del avión y a la agilización de los movimientos de los equipos que darán servicio al avión, por lo tanto la eficacia estará determinada por la libertad de movimiento, las distancias de rodaje mínimas y las mínimas demoras.

Las consideraciones geométricas de gran importancia en el diseño, son por ejemplo la longitud y anchura del terreno disponible para el emplazamiento de la plataforma, ya que podría imposibilitar algunos conceptos de seguridad. La superficie para cada puesto de estacionamiento debe incluir el área necesaria para las calles de acceso al puesto de estacionamiento de aviones así como para las calles de circulación dentro de la misma plataforma (vease 3.3), por último deberán considerarse áreas extras para barreras contra el chorro, estacionamiento para vehículos de servicio y espacio para sus maniobras.

El concepto de flexibilidad se refiere principalmente a la capacidad de la plataforma para poder manejar la variedad de aviones que operaran en el aeropuerto y su posibilidad de ampliación para poder seguir el desarrollo futuro del mismo.

Respecto a la variedad de tamaños de los aviones, el número y dimensiones de los puestos de estacionamiento deberán ser congruentes con las características de la flota esperada y se buscará siempre una solución intermedia entre las dos condiciones extremas que son: un primer criterio que es el diseño

y la utilización de puestos de estacionamiento de dimensiones suficientes para manejar en cada puesto de estacionamiento o posición de la plataforma, el avión de mayor tamaño de la flota esperada. Y el segundo criterio que consiste en diseñar y utilizar distintos estacionamientos de aviones con dimensiones específicas para cada tipo de avión de la flota esperada y en número suficiente para cubrir la demanda por un determinado periodo de tiempo en base a los estudios de planeación.

Con el primer método se tendría mayores costos y tal vez un desperdicio de superficie de las plataformas, pero también una gran flexibilidad operacional, es decir, que se podría manejar cualquier avión en cualquier plataforma aún cuando todos los aviones que se manejarán en un momento dado fueran de gran tamaño, con el segundo criterio tendríamos un mejor aprovechamiento tanto del terreno como de los recursos económicos, sin embargo, tendríamos que sacrificar la flexibilidad operacional de las plataformas y nos veríamos en la necesidad de llevar a cabo remodelaciones y ampliaciones al surgir cualquier incremento en la demanda o cualquier cambio del tipo de aviones de la flota que utiliza el aeropuerto.

La solución intermedia que podríamos considerar como óptima, ya que conjunta la economía con la flexibilidad operacional, se logra dividiendo los aviones de la flota esperada en 2 ó 4 grupos definidos por sus diferentes tamaños y estableciendo los puestos de estacionamiento para las posibles combinaciones entre estos grupos, teniendo siempre como guía de planeación la demanda prevista.

Este último criterio proporcionará a las plataformas el espacio suficiente para poder manejar los incrementos en el número de operaciones y el eventual aumento de tamaño de algún avión, sin tener la inmediata necesidad de llevar a cabo ampliaciones, por un tiempo considerablemente mayor que en el caso del primer criterio. La solución final deberá también estar de acuerdo al plan de desarrollo del aeropuerto.

Por lo dicho anteriormente podemos ver que el otro factor de gran importancia para el diseño de la plataforma es su posibilidad de ampliación, que debe considerarse con la finalidad de no obstaculizar el crecimiento de determinada zona de plataformas, ya que podría provocar una restricción en el aumento de la capacidad operacional del aeropuerto, aunque las pistas y calles de rodaje tuvieran todavía capacidad de crecimiento. Por lo tanto, el sistema de plataformas debe proyectarse en etapas modulares de manera que las ampliaciones requeridas sean parte del sistema total, lo que garantizará la funcionalidad futura entre las mismas y la disponibilidad del terreno necesario para su construcción en el momento que se requiera la ampliación. A continuación se describen los diferentes tipos de plataforma y las operaciones que comúnmente se realizan en ellas. Con lo que se tendrá diversas opciones para la planeación del sistema de plataformas para cuya elección deberá hacerse un análisis de costos y retrasos que pudieran ocasionar las maniobras que deben realizarse para que los aviones entren y salgan, así como los equipos de servicio.

La elección del sistema de plataformas y su ubicación, marcará a su vez, las primeras restricciones para la ubicación y dimensionamiento de los edificios de pasajeros y carga que deberán interfuncionar con los sistemas de transporte terrestre. El diseño de los edificios una vez determinadas dichas restricciones, dependerá mayormente de sus necesidades arquitectónicas, por lo que queda fuera del presente trabajo.

PLATAFORMA DEL EDIFICIO DE PASAJEROS.

Esta plataforma es la zona destinada para las maniobras y estacionamiento de los aviones que está situada junto a las instalaciones del edificio de pasajeros o que ofrece fácil acceso a las mismas, estando en esta zona, los pasajeros realizarán el embarque y

desembarque del avión . Se utiliza también para el abastecimiento de combustible, inspecciones, mantenimiento menor así como embarque y desembarque de carga, correo y equipaje . Cada lugar de estacionamiento para aviones en la plataforma del edificio de pasajeros se conoce como puesto de estacionamiento.

PLATAFORMA DEL EDIFICIO DE CARGA

Esta plataforma es utilizada por los aviones que transportan exclusivamente correo y carga en general, se sitúa junto a las instalaciones del edificio de carga, la separación entre plataformas para carga y pasajeros es necesaria debido a las diferentes instalaciones de los edificios respectivos.

PLATAFORMA DE ESTACIONAMIENTO

Se conoce con este nombre a las plataformas destinadas al estacionamiento de aviones por largos períodos, pueden utilizarse durante la parada estancia de la tripulación o mientras se efectúa el servicio y la tripulación preventiva del avión que se encuentre temporalmente fuera de servicio, aunque las plataformas de estacionamiento deben estar separadas de las de los edificios de pasajeros o carga para que su equipo y personal de tierra no se mezclen y se obstruyan entre sí es recomendable que las plataformas de estacionamiento no estén demasiado retiradas de los edificios .

PLATAFORMAS DE SERVICIO Y HANGARES .

Las plataformas de servicio, son zonas descubiertas y pavimentadas adyacentes a un hangar de reparaciones en la que puede efectuarse el movimiento de los aviones mientras que una plataforma de hangar es una zona desde la cual los aviones entran y salen

de un hangar de estacionamiento o de un hangar de mantenimiento correctivo.

PLATAFORMAS PARA LA AVIACIÓN EN GENERAL.

Estas plataformas son de menores dimensiones y se utilizan para vuelos de negocios o de carácter personal que se efectúan generalmente en aviones monomotores de pistón, bimotores pequeños y jets ejecutivos.

DISEÑO DE LAS PLATAFORMAS.

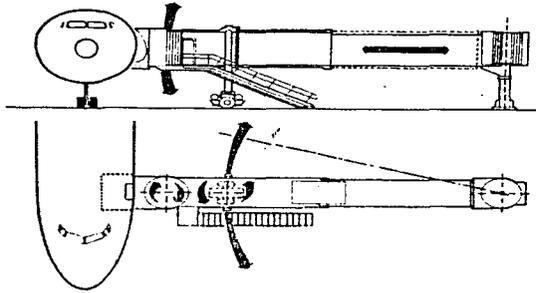
El diseño más adecuado para la plataforma del edificio de pasajeros será el que logre la mayor compatibilidad con las funciones del propio edificio. Otro factor que influirá en el diseño es el volumen y tipo de tránsito. Ya que por ejemplo, en un aeropuerto con un porcentaje desproporcionadamente mayor de tráfico de transbordo internacional, es decir, de conexiones directas con otro vuelo, las necesidades de los edificios, variarían respecto a las de un aeropuerto con mayor porcentaje de pasajeros para los cuales el aeropuerto sea destino o punto de partida. Por lo que el tipo y proporción del tránsito de pasajeros deberá analizarse cuidadosamente para cada aeropuerto en particular, con la finalidad de poder definir las necesidades del edificio de pasajeros y en base a ellas la mejor disposición de las plataformas.

El embarque y desembarque de pasajeros puede hacerse de diferentes formas que repercutirán en el diseño de la plataforma como se verá más adelante, por lo que será necesario describir los diferentes modos de embarque-desembarque antes de tratar su influencia en el diseño de la misma.

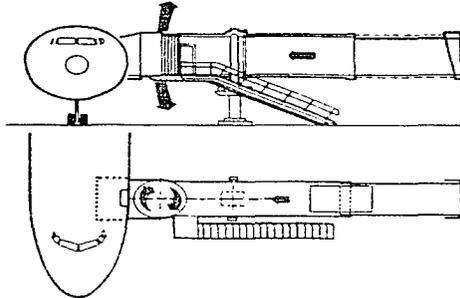
Una forma de embarque - desembarque, es la entrada directa a nivel del avión, que se realiza mediante pasarelas que permiten al pasajero entrar al avión desde el edificio de pasajeros sin necesidad de bajar o subir. Para lo cual existen pasarelas estacionarias y extensibles.

PASARELA ESTACIONARIA. Es una pasarela corta que va adosada a una saliente del edificio, el avión debe estacionarse con la proa hacia adentro a lo largo de dicha saliente, deteniéndose cuando la puerta delantera esté frente a la pasarela, la pasarela se alarga hacia el avión una pequeña distancia y permite una muy limitada variación entre la altura del piso del edificio y el nivel del piso de la cabina del avión.

PASARELA EXTENSIBLE. Es una pasarela telescópica en la que uno de los extremos ya está unido al edificio de pasajeros mediante una articulación y el otro extremo se sostiene sobre un par de llantas orientables con un sistema de locomoción propio, en este caso la pasarela se orienta hacia el avión y se alarga hasta alcanzar la puerta del mismo, el extremo de la pasarela que se acopla al avión también puede levantarse o bajarse considerablemente, permitiendo así atender aviones cuyas cabinas tienen diferentes alturas respecto al piso del edificio.



Arriba puede apreciarse el acoplamiento de una pasarela estacionaria con el fuselaje del avión y abajo la misma situación pero con una pasarela extensible.



ESCALERA MÓVIL. Los pasajeros abordarán el avión por medio de una escalera que se lleva por la plataforma hasta el avión remolacada por un vehículo y se ajusta

para que coincida con el nivel de la puerta, con éste sistema los pasajeros recorren sobre la plataforma a pie o en autobús la distancia entre el edificio de pasajeros y la escalera.

TRANSBORDADORES. En este sistema los pasajeros son transportados por un autobús desde el edificio de pasajeros hasta algún puesto de estacionamiento alejado, ya estando junto al avión, abordan mediante escaleras móviles. Existe otro tipo de autobuses que están equipados con un sistema hidráulico de elevación, que permite a los pasajeros abordar directamente al avión.

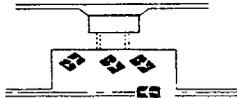
AVIONES CON ESCALERILLA PROPIA. Es un procedimiento parecido al de escalerilla móvil y puede utilizarse en los aviones con escalerilla propia, en este caso la tripulación del avión deberá plegar y desplegar la escalerilla.

Será de gran importancia el preveer las necesidades que pudierá tenerse en cada tipo especial de plataforma para proyectar las instalaciones y el área requerida por el equipo que necesitará, así como para las maniobras de los aviones que se realizarán en ellas.

Como se mencionó anteriormente el diseño de la plataforma se relaciona directamente con el concepto funcional del edificio de pasajeros, que influirá en el modo de estacionamiento de los aviones y por lo tanto en la capacidad de la misma plataforma. Existen varios conceptos de "configuración del edificio - funcionalidad de la plataforma" que se describen e ilustran a continuación

CONCEPTO DE PLATAFORMA ABIERTA. Es un concepto aplicable solo en aeropuertos con poco tránsito, implica que los aviones se estacionen en ángulo, con la proa hacia adentro o hacia afuera del edificio. (La modalidad con la proa hacia afuera del edificio se utiliza poco por el peligro para el mismo debido al chorro de los aviones y al ruido, véase 4-3) Para entrar o salir se desplazarán por sus propios medios, por lo tanto, será necesario establecer una distancia libre entre el borde de la plataforma y el frente del edificio de pasajeros que da a la parte aeronáutica, con el propósito de reducir el efecto del chorro de los motores y en caso

de ser necesario por limitaciones de espacio, deberán colocarse protecciones como barreras contra el chorro que además servirán para la atenuación del ruido en el edificio de pasajeros. La flexibilidad de esta configuración dependerá de la bondad de sus dimensiones y su posibilidad de crecer es amplia ya que se extendería paralelamente al edificio de pasajeros.

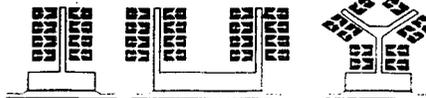


CONCEPTO LINEAL. En este concepto los aviones pueden estacionarse de manera angular o paralela al edificio de pasajeros, pero, el modo de estacionamiento más usado es con la proa hacia adentro ya que con esta posición se logra mayor eficacia en la utilización del espacio y el movimiento tanto de aviones como de pasajeros, además la maniobra de estacionamiento es la más sencilla pero tiene el inconveniente de que para salir deberá ser remolcado por un tractor hasta colocar al avión sobre la calle de la plataforma, sin embargo, esta operación no interferirá con las operaciones en los demás puestos de estacionamiento, si estos, se diseñan correctamente. En aeropuertos con gran tráfico es necesario diseñar calles de doble circulación en la plataforma, para evitar el bloqueo de las operaciones en la calle de circulación por remolque de aviones.

El corredor entre el borde de la plataforma y el frente de la terminal se utiliza normalmente para la circulación de equipo personal y vehículos terrestres. Otra gran ventaja que se tendrá si la profundidad se planifica desde el principio teniendo en cuenta la longitud del fuselaje del avión más grande de la flota, es una gran flexibilidad y una gran posibilidad de expansión como en el caso de "plataforma abierta".



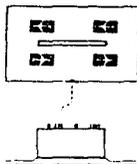
CONCEPTO DE ESPIGÓN. Este concepto se basa en construir extensiones del edificio terminal a manera de muelles llamados espigones. Su ventaja es que los aviones podrán estacionarse en ambos lados del espigón teniendo así un gran número de puestos de estacionamiento con una inversión relativamente pequeña y los aviones pueden estacionarse de manera angular, paralela o perpendicular al eje del espigón. A pesar de tener muchos espacios de estacionamiento, sus posibilidades de expansión gradual son pocas, por lo que el plan de desarrollo por etapas del aeropuerto deberá contemplar desde el principio el lugar para la construcción de nuevos espigones que interfueran óptimamente con los anteriores y con los demás elementos del aeropuerto. En caso de haber dos o más espigones, las operaciones de uno no deberán afectar a las del otro. Por otra parte, el espacio entre espigones paralelos deberá sobrediseñarse ya que en caso de un aumento en el tamaño de los aviones, los espigones no podrían recorrerse físicamente y quedarían restringidos a ser utilizados sólo por aviones menores, por lo tanto deberá considerarse en su diseño el ancho de las calles dobles para el avión de mayor envergadura y los espacios para puestos de estacionamiento considerando el avión de mayor longitud estacionado perpendicularmente a los espigones, más el área de seguridad entre plataforma y espigón, más un espacio extra en prevención de futuros aviones de mayor longitud, el cual quedará a criterio del proyectista.



c) Concepto del espigón

CONCEPTO DE SATÉLITE. Este concepto consiste en construir el edificio de pasajeros dentro de la plataforma e independiente del edificio de pasajeros principal, simulando una isla o satélite que se intercomunica ya sea por medio de un corredor elevado o incluso un pasaje subterráneo para aprovechar mejor el espacio de la plataforma. Dependiendo de la forma del satélite los aviones podrán estacionarse en forma radial, paralela o siguiendo otras configuraciones alrededor del satélite, cuando el estacionamiento se hace en forma radial habrá necesidad de operaciones de remolque pero no conllevará mayor dificultad, sin embargo, la configuración de estacionamiento en cuña requerirá un rodaje previo con virajes cerrados y podría provocar congestión en el tráfico de equipo de servicios en tierra, por último debemos considerar que la posibilidad de ampliación de los satélites es nula y habrá que construir otro satélite en caso de requerir más puestos de estacionamiento.

CONCEPTO DE TRANSBORDADOR EN PLATAFORMA ABIERTA. Esta configuración se conoce también como plataforma remota, es considerada el emplazamiento ideal para las plataformas desde el punto de vista de operación y seguridad del avión, ya que al estar la plataforma cerca de la pista y lejos de las demás estructuras, proporciona facilidad en las maniobras y menor recorrido de rodaje. Por otra parte, no son tan estrictas las medidas de protección contra el chorro y para la atenuación del ruido, ya que serán disipados importantemente debido a que la plataforma estará en medio de espacios abiertos, lo que además le dará gran flexibilidad y posibilidad de expansión. Sin embargo, éste concepto requiere de transporte de pasajeros, equipaje y carga en general mediante autobuses desde los edificios de pasajeros y carga hasta el avión y viceversa lo que podría crear congestionamientos en la zona aeronáutica.



e) Concepto de transbordador (plataforma abierta)

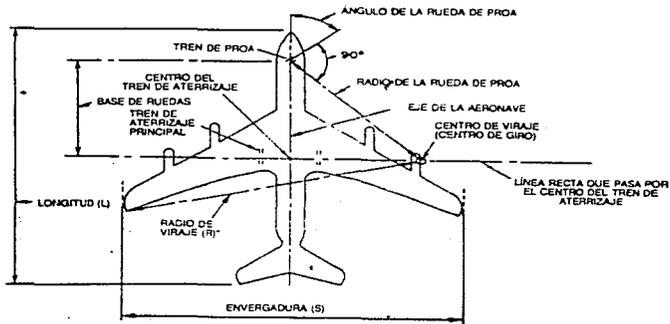
CONCEPTO HÍBRIDO. En esta configuración se combinan algunos de los conceptos mencionados anteriormente. Es bastante frecuente por ejemplo, combinar el concepto de transbordador con alguno de los otros a fin de poder manejar el tráfico durante los períodos de mayor intensidad.

Conociendo ya los propósitos generales de las plataformas, las consideraciones en cuanto al mantenimiento, servicios y embarque que se lleva a cabo en ellas, se continuará con la determinación de sus dimensiones, la cual depende de los siguientes factores:

- Dimensiones de los aviones y características de sus maniobras.
- Volumen de tráfico que opera en la plataforma.
- Requisitos de distancia libre.
- Procedimientos de entrada y salida al peaje de estacionamiento.
- Configuración del edificio terminal.
- Requisitos de las actividades de los aviones en tierra.
- Posición de las calles de rodaje y vías de servicio.

DIMENSIONES DE LOS AVIONES. En base a los estudios de planeación podremos conocer los aviones de la flota esperada y por lo tanto sus dimensiones, lo que al igual que en el caso de pistas y calles de rodaje será

indispensable para el dimensionamiento de las plataformas, en las siguientes figuras se muestra la nomenclatura y los datos de las dimensiones necesarias para determinar el tamaño del puesto de estacionamiento y las dimensiones de los aviones más comunes.



* DETERMINADO POR EL EXTREMO DE LA PROA O DE LA COLA EN ALGUNAS AERONAVES

Dimensiones de los aviones comerciales actuales más comunes. Fuente: doc. 9157, O.A.C.I., en la gráfica anterior se refiere la nomenclatura de cada dimensión.

Tipo de aeronave	Longitud (m)	Envergadura (m)	Ángulo de la rueda de proa	Radio de viraje (m)
A300B-B2	46.70	44.80	50	38.80 a
B727-100	40.59	32.92	75	21.90 c
B727-200	46.68	32.92	75	25.00 c
B737-100	28.65	28.35	70	18.40 a
B737-200	30.58	28.35	70	18.70 a
B747	70.40	59.64	60	60.20 a
B747-400	70.67	64.90	60	60.20 a
B757	47.32	37.95	60	27.90 a
B767	48.51	47.63	60	36.00 a
BAC 111-400	28.50	27.00	65	21.30 a
Caravelle	36.70	34.30	45	29.00 a
Concorde	62.10	25.50	50	30.10 c
DC8-40/50	45.95	43.41	70	29.20 a
DC8-61/63	57.12	43.41/45.2	70	32.70 c
DC9-10/20	31.82	27.25/28.5	75	17.80 c
DC9-30	36.36	28.44	75	20.40 c
DC9-40	38.28	28.44	75	21.40 c
DC9-50	40.72	28.45	75	22.50 c
DC9-80	45.02	32.85	75	25.10 b
DC10-10	55.55	47.35	65	35.60 a
DC10-30	55.35	50.39	65	37.30 a
DC10-40	55.54	50.39	65	36.00 a
L 1011	54.15	47.34	60	35.59 a
Vickers Viscount 800	26.10	28.60	50	21.60 a

a. Hasta el extremo del ala
cola

b. Hasta la proa

c. Hasta la

La longitud del avión (L) y la envergadura (S) pueden utilizarse como punto de partida para determinar la dimensión total del área del puesto estacionamiento, las demás áreas de seguridad resultantes de los requerimientos de distancias libres entre los puestos de estacionamiento así como entre puestos de estacionamiento y calles de rodaje, edificio de pasajeros, etc. Finalmente, en caso de ser necesario, se añadirán a esta área básica de estacionamiento, las áreas requeridas para la maniobrabilidad

de los aviones que se tratarán en el capítulo anterior y que a su vez dependen de la posición del centro de viraje (punto en torno al cual gira el avión) de los mismos. Los valores de la tabla anterior para los radios de viraje se derivan de los ángulos de la rueda de proa que aparecen también en la tabla, en general, estos valores de los radios se miden desde el centro del viraje hasta el extremo del ala, sin embargo, en algunos aviones, los extremos de popa de los estabilizadores horizontales son los puntos críticos.

Otro factor que influirá en la planeación para el desarrollo de las plataformas, es el cálculo de espacios necesarios para maniobras, que se realizará en función del pronóstico de actividad en la plataforma. De ahí la importancia de calcular, de la manera más precisa posible, el volumen de tránsito que se pueda tener en un momento dado.

Por lo cual, aunque pareciera inadecuada debido a su alto costo, la construcción de plataformas con dimensiones suficientes para manejar las operaciones de todos los aviones que pudieran haber en un momento crítico. Es la mejor solución considerando que el aumento en el número de operaciones y el posible incremento de las dimensiones de los aviones en el futuro, requerirá mayores dimensiones de plataforma y por lo tanto, el aparente exceso de área será utilizado totalmente después de algún tiempo. Proporcionando de momento, una gran flexibilidad y grado de seguridad a la plataforma. Pero será necesaria la planeación del crecimiento total desde el principio así como la determinación del concepto "plataforma-edificio de pasajeros" más adecuado.

Conociendo ya los usos de las plataformas, las ventajas y ventajas de sus disposiciones geométricas y las consideraciones que deben hacerse debido al tránsito. Se describirán a continuación los modos de estacionamiento de aviones y las características del chorro que expulsan, ya que ambos factores también influyen en su diseño.

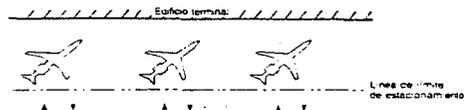
MODALIDADES DE ENTRADA Y SALIDA AL PUESTO DE ESTACIONAMIENTO

Los procedimientos que el avión sigue para entrar y salir de los puestos de estacionamiento pueden ejecutarse mediante la propulsión del avión o remolcado por tractores. Dado que las maniobras que se realicen repercutirán en las dimensiones necesarias para la plataforma, se explicarán a continuación dichos procedimientos.

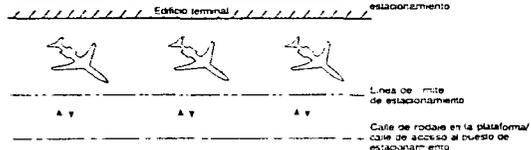
MANIOBRA AUTÓNOMA. El avión puede entrar y salir del puesto de estacionamiento mediante su propia propulsión pero con la limitante de tener siempre que desplazarse hacia adelante, por lo tanto deberá conservar mayores distancias de separación con otros aviones que le permitan ejecutar la maniobra y la forma de entrada deberá evitar los virajes bruscos, más adelante aparecen dibujos donde se muestran las trayectorias y áreas proporcionales necesarias para que los aviones realicen las maniobras según la configuración de estacionamiento, que puede ser en ángulo con la proa hacia adentro o hacia afuera del edificio, o paralelo a este.

La maniobra más utilizada para entrar y salir del puesto de estacionamiento junto al edificio terminal, es en ángulo con la proa hacia adentro ó hacia afuera, lo que hará necesario un viraje de 180°, el radio del viraje y la configuración propia del avión determinarán la separación entre los puestos de estacionamiento. Este método de estacionamiento requiere más superficie pavimentada que la necesaria cuando se utiliza un tractor, sin embargo, su costo extra se compensa con el ahorro de tractores y sus operadores. Por otro lado, la maniobra es más tardada en general que la realizada con tractor por lo que es el método más adecuado para aeropuertos con volúmenes de tránsito medio o bajo.

- a) Entrada y salida en rodaje (estacionamiento en ángulo con proa hacia adentro)

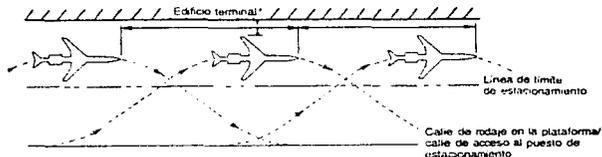


- b) Entrada y salida en rodaje (estacionamiento en ángulo con proa hacia afuera)



Otra maniobra mediante desplazamiento autónomo es la realizada para estacionamiento paralelo al edificio terminal, su ventaja es que al no requerir virajes fuertes la maniobra de entrada y salida se puede efectuar en muy poco tiempo, pero su desventaja consiste en que requiere alrededor de un 140 % de área pavimentada respecto al área necesaria cuando se usa el procedimiento anterior.

- c) Entrada y salida en rodaje (estacionamiento en paralelo)

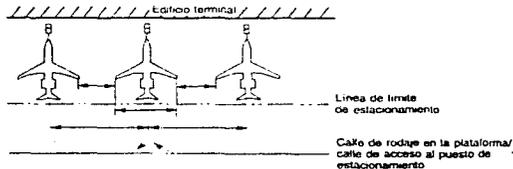


Para esta maniobra habrá necesidad de colocar protecciones contra el chorro pues la expulsión de gases de un avión puede dañar al equipo de servicio y mantenimiento en tierra o al avión que se encuentra en la posición anterior, en la sección 4.3 se mencionan algunos sistemas de protección contra el chorro.

REMOLQUE CON TRACTOR . Los procedimientos de remolque pueden utilizarse únicamente para que el avión entre al puesto de estacionamiento, salga de éste, o en ambas maniobras, su gran ventaja es que al no requerir giros del avión, el espacio necesario para cada puesto de estacionamiento es mucho menor al que se necesita con cualquiera de los métodos anteriores de estacionamiento y por lo tanto se aprovecha al máximo el área pavimentada, sin embargo, los costos de operación se incrementan por la necesidad de tractores y los gastos que conllevan como combustibles, mantenimiento y operadores .

Por otra parte al utilizar este método de estacionamiento, no será necesaria ninguna protección contra el chorro de los motores ya que se estacionan con la proa hacia el edificio y salen remolcados, por lo que la expulsión del chorro inicia hasta que el avión se encuentra en la zona de rodaje .

d) Entrada en rodaje/
salida por empuje



En este último caso la anchura de los puestos de estacionamiento estará dada por la envergadura del avión más la distancia libre de seguridad medida desde las puntas de las alas del mayor avión esperado hasta el límite de la plataforma contigua y la longitud, será la del avión más la longitud del tractor, más las distancias de seguridad medidas desde la punta de la proa hacia el edificio terminal y la posterior medida desde el extremo del tractor hasta el límite exterior de la plataforma .

A pesar de que se ha mencionado indirectamente la importancia de las calles de circulación dentro de las plataformas, no es por demás mencionar que sin un dimensionamiento adecuado de las mismas dentro de la plataforma, no lograríamos en realidad un buen diseño de ésta, y en el caso de tener que operar con aviones cuyas dimensiones fueran mayores a las que se utilizaron para el diseño, se tendría que utilizar espacio de las calles de rodaje o de otros puestos de estacionamiento para poder manejar dichos aviones, provocando congestionamientos, esperas e inseguridad. Las anchuras de las calles de circulación serán las mismas que se especifican en 3.3, ya que son una prolongación del sistema de calles de rodaje dentro de la plataforma, por lo tanto, conservarán en cada caso la anchura de la calle de rodaje precedente pero sin considerar la franja. A continuación se incluyen las dimensiones actuales recomendadas por la O.A.C.I. para el diseño de plataformas.

4.2 ANCHOS Y SEPARACIONES.

El puesto de estacionamiento de aviones debe cumplir con las distancias libres mínimas entre los aviones así como entre los aviones y los edificios cercanos u otros objetos fijos (Doc. 9184 , O.A.C.I. Planificación General), la distancia mínima aparece en la siguiente tabla según la letra de clave del aeropuerto que a su vez depende de la envergadura de los aviones que opera , según se vió en el capítulo 1 .

LETRA DE CLAVE	DISTANCIA LIBRE (m)
A	3.0
B	3.0
C	4.5
D	7.5
E	7.5

Quando la letra de clave sea D ó E, la distancia libre anterior podría reducirse sólo en caso de que el avión efectue la maniobra de entrada a plataforma en rodaje y la salida remolcado por tractor, dicha distancia puede reducirse entre la terminal y la proa del avión y en cualquier parte del puesto de estacionamiento equipado con guía de azimut proporcionada por algún sistema de guía visual para el atraque.

La consideración de distancias libres mayores estará a criterio del proyectista y proporcionará las ventajas que se han comentado, el emplazamiento de las calles de acceso al puesto de estacionamiento y las calles de circulación en plataforma deben permitir una separación entre el eje de estas calles y los aviones en el puesto de estacionamiento no menor a las que se indican a continuación.

LETRA DE CLAVE

SEPARACIÓN MÍNIMA

	ENTRE EL EJE DE UNA CALLE DE ACCESO AL PUESTO DE ESTACIONAMIENTO Y UN AVIATO.	ENTRE EL EJE DE UNA CALLE DE RODAJE EN LA PLATAFORMA Y UN AVIATO.
	(m)	(m)
A	12.5	16.5
B	16.5	21.5
C	24.5	26.6
D	36.0	40.5
E	42.5	47.5

Para concluir este capítulo se analizarán los efectos del chorro de los aviones en la zona aeronáutica debido a las molestias y daños que pueden ocasionar. Lo que hará necesario que se contemplen defensas o espacios suficientes para aminorar sus efectos dentro de la planeación global del proyecto, y que por lo tanto, podrían afectar el dimensionamiento de las plataformas o de áreas libres entre los elementos de la zona aeronáutica y las áreas por donde transite ya sea el público en general o el personal de servicios en tierra.

4.3 EFECTOS DEL CHORRO DE LOS REACTORES Y EL RUIDO EN LA ZONA AERONÁUTICA.

Las corrientes de aire resultantes del funcionamiento de los motores de hélice de los aviones se conocen comúnmente como "torbellino de las hélices" y a la expulsión de gases provenientes de la combustión en las turbinas de los aviones de reacción o "jets" se le conoce con el nombre de "estela" o "chorro de las turbinas".

Los efectos secundarios que producen estos fenómenos en las instalaciones y el equipo en tierra hacen que tengan una gran importancia y que sus efectos deban prevenirse para lograr un buen diseño de los elementos de la zona aeronáutica, en realidad los efectos de "torbellino de hélice" no son tan severos como los del "chorro de las turbinas", por lo tanto los estudios que se han realizado al respecto han estado enfocados a este último fenómeno. Ya que los efectos debidos al "torbellino de hélice" quedan incluidos al diseñar protecciones contra el "chorro".

Los efectos perjudiciales son las altas velocidades del viento y gases expulsados, ruido y elevadas temperaturas de los gases. Un problema generado por las altas velocidades es que las arenas, gravas u otros objetos sueltos puedan ser lanzados como proyectiles a grandes distancias y causen daños a equipos, edificios, personas u otros aviones. El ruido y el calor además de ser molestos para el

personal de servicio en tierra podrían causar sordera a largo plazo y quemaduras ocasionales.

Además los altos niveles de ruido en zonas urbanas adyacentes al aeropuerto podrían ocasionar serias protestas de la población que derivarán incluso en la necesidad de desplazar umbrales de pista (vease 2.2), suspender el funcionamiento de plataformas cercanas a la zona habitada o modificar el sistema de calles de rodaje, lo que implicaría un desajuste total en la operación de la zona aeronáutica y en el plan de desarrollo por etapas del aeropuerto. Por lo tanto, desde el principio del diseño de cada elemento del sistema, deberán contemplarse los efectos de ruido y restringirse los diseños de manera que no se provoquen molestias excesivas a la población, o bien, realizar dichos diseños incluyendo medidas de atenuación de ruido.

Dado que el empuje del chorro de los motores es de diferente intensidad dependiendo de la actividad del avión dentro de la zona aeronáutica, es decir, rodaje, mantenimiento o arranque en pista. Se han diferenciado 3 niveles de empuje para determinar las velocidades críticas que se utilizarán para diseñar edificios y pavimentos por empuje lateral y por erosión respectivamente. Casi todas las instalaciones cercanas al área de movimiento del avión estarán sometidas por lo menos al empuje en régimen de marcha lenta, pero debemos utilizar el régimen del avión que consideremos crítico para los cálculos necesarios.

El empuje en el arranque es el nivel de empuje necesario para que el avión inicie su marcha, y alcanza valores de entre 20 % y 30 % del empuje continuo máximo, que es el empuje necesario para el despegue.

Las velocidades de expulsión de gases o chorro varían mucho dependiendo de la manibra que realice el avión y el funcionamiento de sus motores, siendo 35 mph (56 km/h) la velocidad a partir de la cual se considerarán inconvenientes los efectos causados por el "chorro", y por lo tanto, no deberán permitirse

velocidades mayores de 56 km/h*. En caso de no poder disponer de barreras anti-chorro se tendría la opción de ampliar las plataformas y en general las distancias entre las zonas de expulsión del "chorro" y las instalaciones. Sin embargo, la mejor solución entre construir barreras, agrandar distancias libres y reforzar estructuras o una combinación de las mismas, sólo se podría obtener mediante un análisis económico y conociendo las circunstancias específicas de cada caso particular.

* AIRPORT DESIGN STANDARDS EFFECTS AND TREATMENT TO JET BLAST, U.S. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, ADVISORY CIRCULAR AC 158/5325-GA.

La O.A.C.I. en su "Manual de diseño de aeródromos, parte 2, Doc. 9157 - AN/901" ha preparado mediante la observación directa, tablas en que se indica la distancia medida desde la cola del avión hasta donde la velocidad del chorro queda reducida a 56 km/h y que se conoce como "umbral de comodidad". A continuación se presentan los resultados de estos estudios para cada uno de los cuatro tipos representativos de aviones comerciales y sus niveles de empuje.

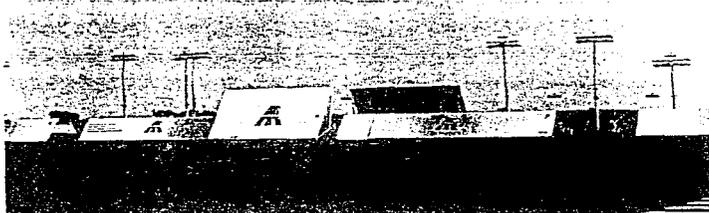
TIPO DE AVIÓN (representativo)	EMPUJE EN MAR- CHA LENTA	EMPUJE EN EL ARRANQUE	EMPUJE EN EL DESCUPEJO
	(m)	(m)	(m)
DC8	6	79	160
B727	28	48	130
B747	72	250	410
DC10	64	180	450

Como podemos observar en la tabla anterior los aviones comerciales de fuselaje alargado como el B747 y el DC10 expulsan en general un "chorro" que requiere para disiparse hasta el "umbral de comodidad", distancias 2 ó 3 veces mayores que las requeridas por los reactores pequeños como el DC8 y el B727, en la siguiente tabla aparecen para los mismos aviones las velocidades del chorro a 15 y 30 metros de la cola del avión.

Tipo de aeronave	Velocidad del chorro a 15 m			Velocidad del chorro a 30 m		
	Marcha lenta (km/h)	En el arranque (km/h)	En el despegue (km/h)	Marcha lenta (km/h)	En el arranque (km/h)	En el despegue (km/h)
Reactores comerciales						
DC8	29	122	210	14	66	151
B727	106	159	300	53	96	290
B747	74	154	320	67	143	260
DC10	116	250	610	85	177	420
Reactores de negocios						
Lear-Commander	47	95	215	21	43	98
Faicon	72	137	305	43	54	146
Sabreliner	73	152	370	35	74	169
Gulfstream-II	145	297	675	80	141	320

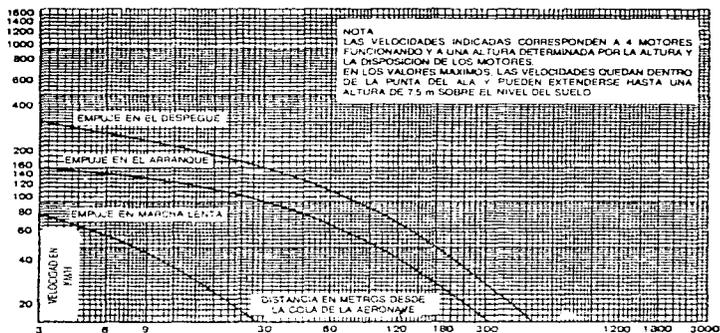
Por medio de varios estudios se ha demostrado que las velocidades del chorro son cíclicas con 2 a 6 valores máximos por segundo, que no son lateral ni verticalmente continuos y que cubren zonas pequeñas. Por lo que para poder llevar a cabo el diseño de las instalaciones tomando en cuenta el efecto del "chorro", los fabricantes elaboran un documento con las características promedio de sus aviones a fin de poder planificar los aeropuertos, conocido como (NAS 3601) que contiene información sobre velocidades de expulsión de gases y perfiles laterales y verticales de "chorro". En las páginas siguientes aparecerán las curvas de velocidades de "chorro" para diferentes niveles de empuje y los perfiles correspondientes a los 4 aviones comerciales más representativos a los que se ha hecho referencia anteriormente.

NOTA: Las graficas antes mencionadas son las que aparecen en los documentos (NAS 3601)

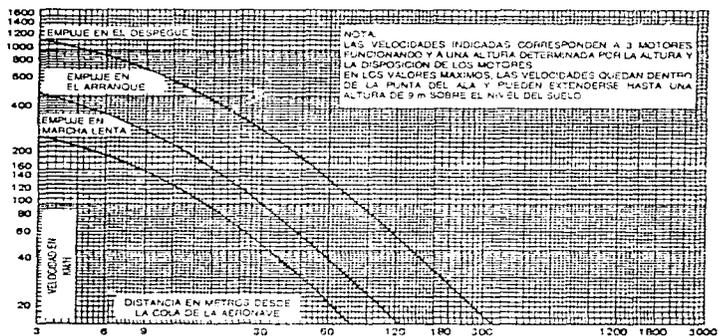


En la foto superior puede apreciarse barreras antichorro en las plataformas de estacionamiento y mantenimiento de "Mexicana", AICM

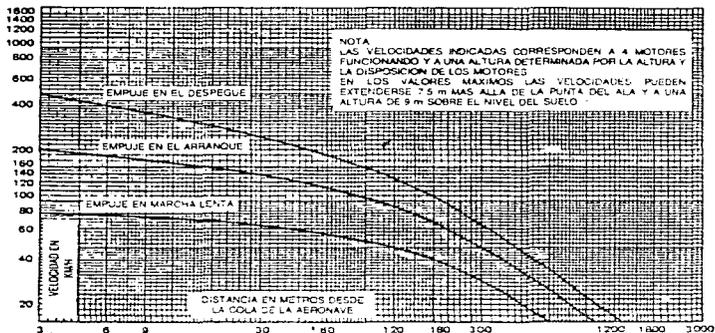
Curvas de velocidades máximas del chorro (DC8)



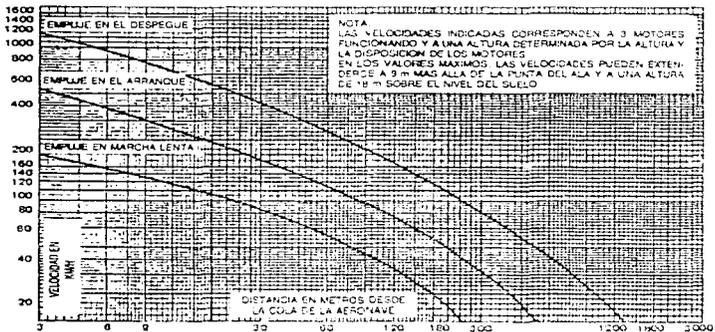
Curvas de velocidades máximas del chorro (B727)

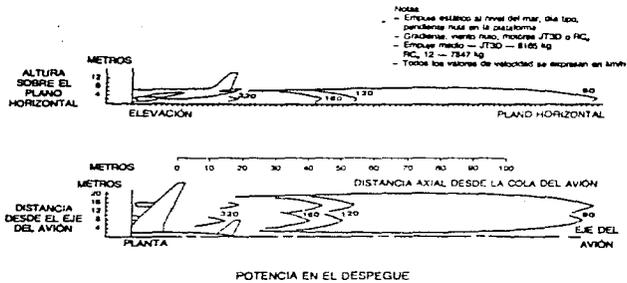
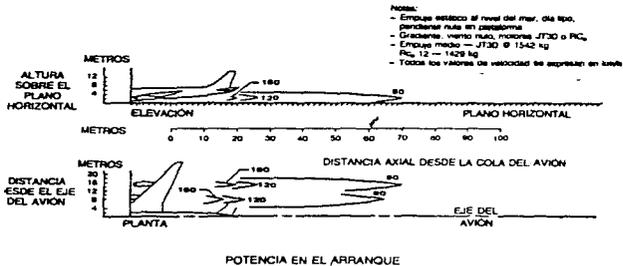


Curvas de velocidades máximas del chorro (B747)

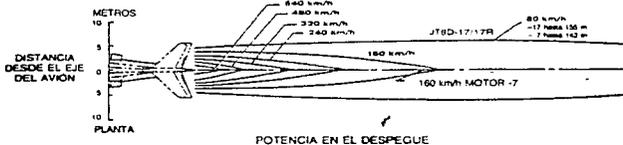
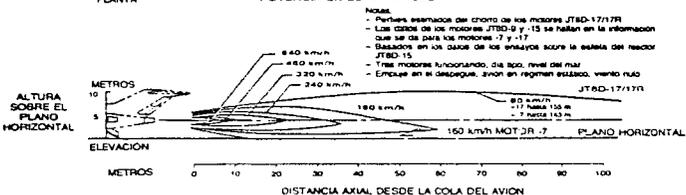
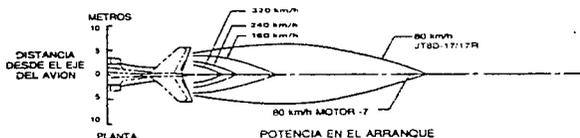
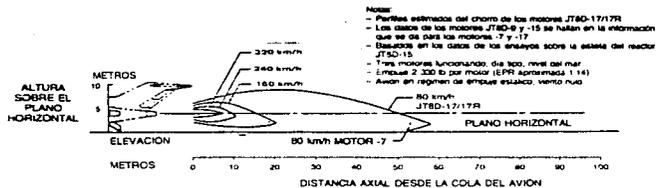


Curvas de velocidades máximas del chorro (DC10)

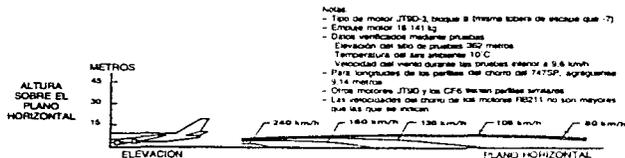
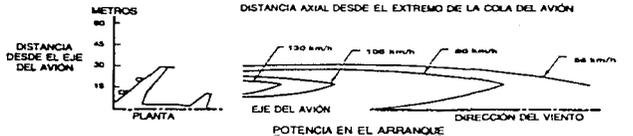
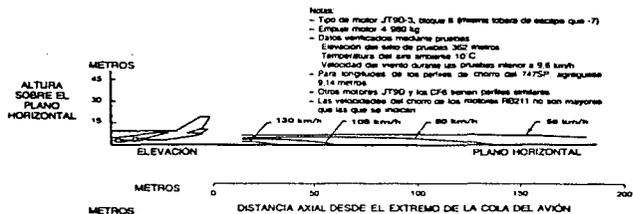




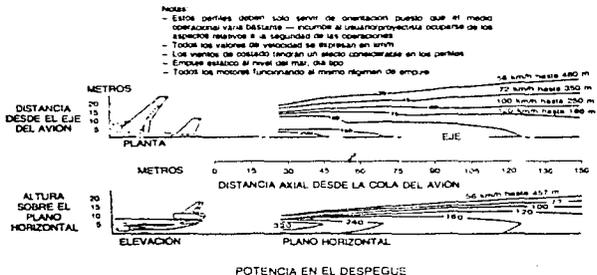
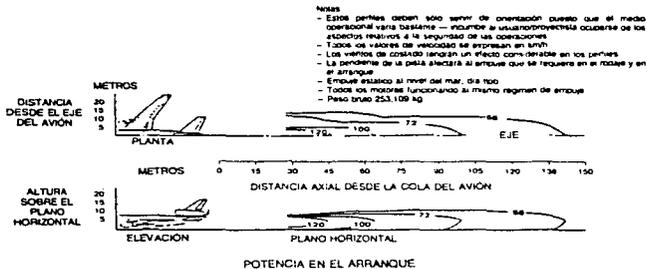
Perfiles de velocidad del chorro de los reactores modelo DC8 .



Perfiles de la velocidad del chorro de los reactores modelo B727.



Perfiles de velocidad del chorro de los reactores modelo B747.



Perfiles de velocidad del chorro de los reactores modelo DC10.

Ahora bien, ya que podemos conocer para cada caso particular las velocidades del "chorro" y los perfiles correspondientes para el o los aviones que consideremos críticos, el siguiente paso antes de poder diseñar las defensas anti-chorro, será evaluar la presión que el chorro ejercerá sobre dichas defensas. En el caso de poder contar con grandes terrenos, se podría sustituir algunas defensas por espacios libres, pero en un caso determinado la decisión dependerá de la conveniencia económica.

PRESIÓN DEL CHORRO.

Las fuerzas generadas por el chorro del reactor pueden calcularse mediante las formulas de presión del viento, cuya forma general es:

$$P = CV^2$$

donde:

P - Presión (kg/m²)

C - Factor de forma

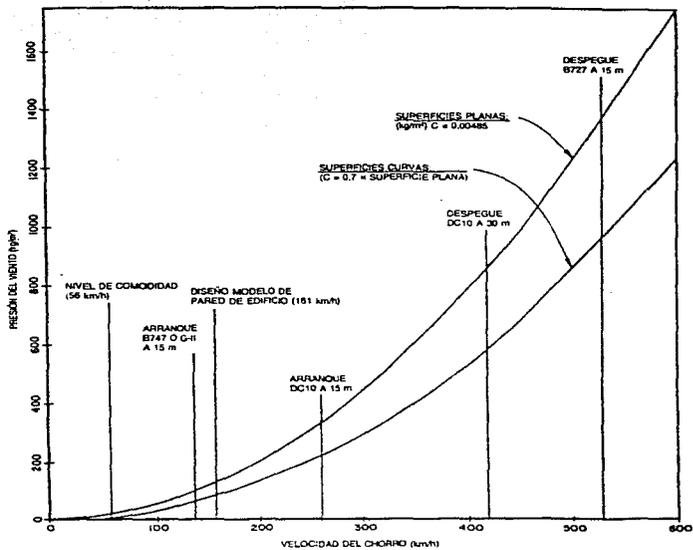
V - Velocidad del viento perpendicular a la superficie. (km/h)

En la sig. página se muestra una gráfica que relaciona la velocidad del "chorro" con la presión ejercida, de manera que podemos conocer la presión mediante un cálculo simple conociendo el factor de forma de la barrera que pensamos construir o mediante la información que nos proporciona la gráfica, en esta última la curva superior representa la presión sobre una superficie plana perpendicular a la dirección del "chorro", que es cuando se produce la mayor presión posible y se considera para este caso que el coeficiente C = 0.00485 dentro de la fórmula anterior.

La curva inferior corresponde a una superficie de forma más aerodinámica con un coeficiente de factor de forma de 70 % del coeficiente máximo que corresponde a la superficie perpendicular.

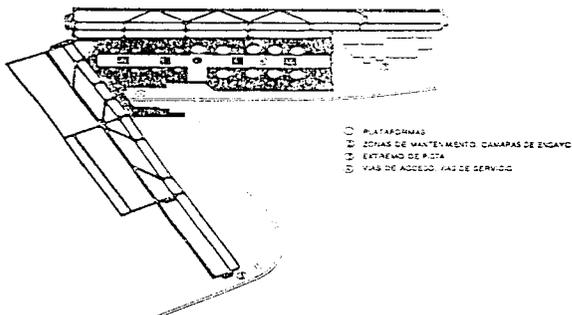
La fuerza total en una superficie curva puede obtenerse multiplicando la presión por el área de la

superficie proyectada en un plano perpendicular a la dirección del chorro. Por otro lado, hay que tomar en cuenta que la presión es función del cuadrado de la velocidad del "chorro" y que también dicha velocidad decrece al aumentar la distancia libre entre las turbinas y las defensas según lo visto anteriormente, de manera que el colocar las defensas lo más lejos posible de la zona de maniobras traerá como beneficio un menor costo estructural de las mismas ya que la presión sobre ellas será menor.



Presión del chorro en función de su velocidad.
Fuente: "Manual de diseño de aeródromos", parte 2, O.A.C.I.

Las barreras anti-chorro son la mejor defensa contra la expulsión de gases mediante la desviación de los mismos, su instalación será necesaria cuando no sea posible establecer separaciones suficientes para lograr atenuar el "chorro" hasta el "umbral de comodidad" y existen lugares en todos los aeropuertos en los que la existencia de las barreras es prácticamente obligada y aún en casos excepcionales son recomendables (Manual de diseño de aeródromos, parte 2, O.A.C.I. Doc. 9157). Dichos lugares son la zona de plataformas, mantenimiento, extremos de pista, vías de acceso y de servicios, las cuales se representan en el dibujo siguiente:



- 1 PLATAFORMAS
- 2 ZONAS DE MANTENIMIENTO, CÁMARGAS DE ENLACE
- 3 EXTREMO DE PISTA
- 4 VÍAS DE ACCESO, VÍAS DE SERVICIO

Para el diseño dimensional y estructural de las barreras deben tomarse en cuenta también factores que dependen de las características del chorro, como su altura de expulsión y su ancho de dispersión.

La altura del eje del chorro depende de la altura y del ángulo de las turbinas del avión, en general para todos los aviones con los motores suspendidos de las alas la altura de las turbinas oscila entre 2.5 y 3 m.

Salvo en el caso de los aviones de fuselaje largo, la dispersión lateral de los vientos del chorro normalmente queda circunscrita a un ancho definido por los extremos de ala de los aviones.

Para comenzar con la planificación de un sistema de barreras anti-chorro para un nuevo aeropuerto o alguno ya existente, deberán determinarse los aviones que lo utilizarán y sus posibles movimientos para definir las orientaciones del chorro. En el caso de un nuevo aeropuerto, dicha información podría utilizarse incluso como un criterio para limitar la construcción y el emplazamiento de otras instalaciones.

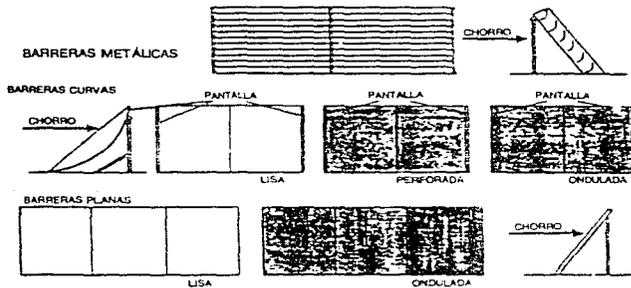
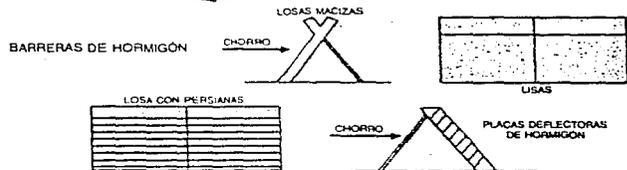
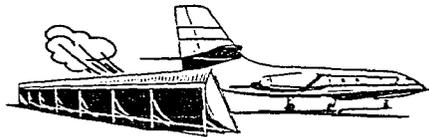
En el caso de realizar dicho estudio para un aeropuerto ya existente, los resultados del estudio nos indicarán los lugares en donde serán necesarias las barreras.

Existen en general 2 tipos de barreras, las fijas que normalmente se construyen con concreto y las móviles que casi siempre son metálicas y por su forma se dividen en barreras de un solo vano y de varios vanos (persianas).

El cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, realizó experimentos para determinar la eficacia de las barreras de un solo vano en comparación con las de varios vanos, obteniendo prácticamente los mismos resultados de dispersión del chorro. Una ventaja de las barreras de vanos múltiples o "persianas" es que desvían el chorro en toda su altura y por lo tanto la estructura soportará el mismo empuje, pero la fuerza soportada por cada vano será menor que para las barreras continuas en las mismas condiciones.

Las barreras antichorro deberán ser producto de un diseño estructural cuidadoso ya que soportarán las fuerzas de empuje debidas al chorro. Con lo que se ha mencionado hasta ahora, es posible ya para algún caso particular determinar el sitio donde deberán colocarse las barreras, el ancho y la altura de las mismas, la presión total del viento sobre estas y por lo tanto la fuerza a que estarán sometidas, restando sólo hacer el diseño de la estructura de la barrera, ya sea metálica o de concreto armado. En la siguiente página se ilustran los diferentes tipos de barreras contra el chorro.

Tipos de barreras contra el chorro.



CAPÍTULO 5. PAVIMENTOS.

5.1 GENERALIDADES.

Los elementos de la zona aeronáutica que se dimensionarán en función de lo visto en los capítulos anteriores, se constituirán físicamente por estructuras de pavimento. Por lo que al incluir éste tema, se logrará integrar los elementos básicos para el diseño geométrico de la zona aeronáutica.

El diseño de los pavimentos obedecerá a las características geotécnicas del suelo de cimentación y a las cargas a las que estará sometido. Por lo tanto, debido a estos últimos factores, es claro que la longitud de pista y las masas de los aviones esperados, influirán en el diseño de espesores, lo cual se analizará en 5.4.

A continuación se describirán las necesidades que la estructura de pavimento debe cubrir, los tipos de pavimentos existentes, y el método de diseño utilizado por la F.A.A.. Pretendiendo con esto reunir la información necesaria para iniciar algún diseño o revisión en particular.

El pavimento es la estructura formada por varias capas de materiales pétreos de buena calidad cuyas sus funciones son:

- a) Proporcionar una superficie plana para poder realizar las maniobras de aterrizaje y despegue de manera cómoda y segura.**
- b) No sufrir deformaciones permanentes importantes.**
- c) Tener una superficie antiderrapante y antidestruyante.**
- d) Resistir y transmitir las cargas debidas a las operaciones de manera uniforme.**

Al hablar de pavimentos existen básicamente 2 tipos que son los de concreto hidráulico ó rígidos

y los de concreto asfáltico ó emulsiones asfálticas conocidos como pavimentos flexibles. Actualmente existen aditamentos para el pavimento flexible como los geotextiles que retardan el reflejamiento de fallas naturales del suelo de cimentación en la superficie del pavimento, impiden la incrustación de materiales entre capas etc. E incluso se ha experimentado con combinaciones de ambos sistemas que eventualmente podrían recibir otro nombre, pero en realidad, todos son adaptaciones y mejoras a los 2 sistemas básicos mencionados.

Pavimento flexible es el sistema multicapa formado por una capa llamada sub-base, otra de base y una capa de concreto asfáltico que servirá como superficie de rodamiento, las cuales se apoyan sobre la terracería o suelo de cimentación. Dentro del sistema multicapa la resistencia de cada capa se incrementa al aproximarse a la superficie y recibe el nombre de pavimento flexible debido a que la capa de concreto asfáltico resiste hasta cierto grado deformaciones sin sufrir agrietamiento.

Pavimento rígido es el nombre que se le da a la estructura formada principalmente por una losa de concreto hidráulico y una capa de sub-base apoyadas sobre el suelo de cimentación o terracería, en este sistema la losa constituye un elemento de gran rigidez que no acepta deformaciones y por lo tanto las cargas que transmite a las capas inferiores son mucho menores que en el sistema de pavimento flexible. El material para base deberá ser de buena calidad e inerte al igual que en el otro sistema pero su espesor generalmete es menor que para el pavimento flexible.

En ambos casos la capa de base tiene la función de transmitir las cargas que la sub-base (en caso de ser necesaria su construcción) o el suelo de cimentación pueda soportar, drenar el agua que se filtre por la carpeta o losa, e impedir que el agua del suelo de cimentación ascienda por capilaridad.

En los pavimentos flexibles, la capa de sub-base tiene la misma razón de ser que la capa de base más una función económica, ya que el material con el que se construye es más barato que el de base y su construcción posibilitará una reducción en el espesor de la carpeta, ésta capa regularmente no se construye más que para pavimentos flexibles, sin embargo, en ambos casos aumentará notablemente la resistencia, capacidad de drenaje y por lo tanto vida útil del pavimento.

Otra opción para aumentar la resistencia y la capacidad de drenaje sin tener que construir sub-base sería el aumentar el espesor de base, de modo que podemos decir que el espesor de la sub-base estará en función del menor costo entre varias opciones con las que se contará en cada caso particular.

5.2 BASES Y SUB-BASES.

Estas capas integrantes de la estructura del pavimento se construyen sobre la capa subrasante, debajo de la cual tenemos la terracería o suelo de cimentación, las bases y sub-bases tienen finalidades similares pero el material de sub-base es de menor calidad, es decir, su granulometría es menos homogénea, su contenido de finos mayor y la resistencia propia del agregado puede ser menor por lo que su costo será menor al del material de base.

Las funciones de dichas capas dentro de la estructura de pavimento son:

- Recibir y resistir las cargas de tránsito que se transmiten a través de la capa que construya la superficie de rodamiento ya sea carpeta asfáltica o lora.
- Transmitir las cargas recibidas de una manera uniforme hacia las terracerías o suelo de cimentación.

. Impedir que la humedad de las terracerías o suelo de cimentación ascienda por capilaridad.

. Permitir que el agua que se introduzca por la superficie del pavimento descienda através de ellas hasta el suelo de cimentación.

Las características de los materiales que se emplearán en las capas de base y sub-base deberán cumplir con una buena calidad en los siguientes aspectos :

. Resistencia, esta propiedad puede medirse mediante el VRS (valor relativo de soporte) que se determina mediante la prueba Porter Estándard, o el CBE (California bearing ratio), en México se considera que el VRS = CBE "

. Masticidad, que se determina mediante pruebas de contracción lineal.

. Valor cementante, que dependerá del contenido de fines y su capacidad aglutinante.

A continuación aparecen gráficas y cuadros obtenidos en laboratorio en los que se establece la calidad requerida de los materiales en cuanto a las características antes mencionadas en función de su granulometría (Estructuración de vías terrestres , Fernando Olivera Bustamante , C.E.C.S.A.)

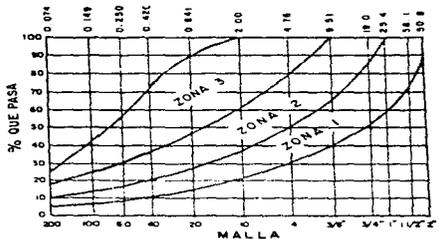
Características de calidad que se requieren en los materiales que se utilizarán como sub-bases de pavimento.

CARACTERÍSTICAS	ZONAS EN QUE SE CLASIFICA EL MATERIAL DE ACUERDO CON SU GRAMULOMETRÍA		
	1	2	3
Contracción lineal, en porcentaje (Máx.)	6.0	4.5	3.0
Valor cementante, para materiales angulosos, en kg./cm ² (Mín.)	3.5	3.0	2.5
Valor cementante, para materiales redondeados y lisos, en kg./cm ² (Mín.)	5.5	4.5	3.5
Valor relativo de suaire estándar utilizado, en porcentaje	50 Mín.		
Equivalente de arena, en porcentaje	20 Mín. (Tentativo)		

Características de calidad que se requieren en los materiales que se utilizarán como bases de pavimento

CARACTERÍSTICAS	ZONAS EN QUE SE CLASIFICA EL MATERIAL DE ACUERDO CON SU GRAMULOMETRÍA		
	1	2	3
Límite líquido, en porcentaje (Máx.)	30	30	30
Contracción lineal, en porcentaje (Máx.)	4.5	3.5	2.0
Valor cementante, para materiales angulosos, en kg./cm ² (Mín.)	3.5	3.0	2.5
Valor cementante, para materiales redondeados y lisos, en kg./cm ² (Mín.)	5.5	4.5	3.5

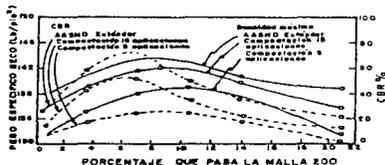
Zonas granulométricas a las que se refieren las especificaciones de base y sub-base.



Por lo dicho anteriormente podría utilizarse material de cualquier banco cuya curva granulométrica quede dentro de las zonas respectivas a las mostradas en la gráfica anterior de zonas granulométricas y que cumpla además con las especificaciones de calidad de los cuadros para bases y sub-bases que se mostraron anteriormente. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que deben tenerse algunas excepciones ya que un alto contenido de finos propiciaría el almacenamiento de agua y por lo tanto se posibilitarían fenómenos de bombeo en el caso de pavimentos rígidos, que provocarían su falla, o peor aún si se tratará de finos expansivos, ya que sufriría cambios volumétricos continuos y la falla se presentaría más rápidamente. Personalmente creo que las mejores granulometrías para base serán aquellas cuyas curvas se encuentren en la zona 1, es decir, que su contenido de finos sea menor de 10%.

Otra razón para mi opinión anterior, son los resultados obtenidos por Yoder y el Witzjak* al observar las variaciones del VRS y el CBR (cuyo significado físico es el mismo) de una grava al proporcionarles diferentes contenidos de finos. Ellos obtuvieron que el VRS de la grava se

incrementaba al agregarle finos hasta un cierto porcentaje máximo a partir del cual el VRS de la grava disminuye al seguir aumentando el porcentaje de finos, por lo que además del problema de almacenamiento de agua que los finos representan, el VRS de una grava empieza a disminuir al tener más del 6% de finos, en su granulometría según los resultados de Yoder y Witczak que aparecen en la sig. gráfica.



* The principles of pavement design, Yoder & Witczak, JW, 1975.

Por último mencionaremos que las bases y sub-bases pueden ser mejoradas agregando a sus materiales cemento portland, cal o asfalto, en estos casos ya no habría peligro de expansión o deformación de sus materiales e inclusive nos permitiría una disminución de espesores de las diferentes capas del pavimento.

El método de la F.A.A. sugiere que si el avión de diseño pesa más de 100,000 lb la base y la sub-base deben ser estabilizadas, sin embargo, dicha estabilización no es obligatoria, ciertamente su uso traería una disminución de espesores pero también costos extra que tal vez no fueran necesarios, por lo que la decisión en cuanto

a su colocación podría basarse en un análisis de costos entre las 2 opciones.

Se han establecido rangos de los factores por los que se multiplica la resistencia de las bases y sub-bases cuando se estabilizan con diferentes materiales, dichos factores pueden ser usados según el criterio del diseñador para reducir los respectivos espesores.

Factores para sub-base		Factores para base	
Material	Factor	Material	Factor
s.base bituminosa P 201	1.7-2.03	base bituminosa P 401	1.2-1.6
s.base tratada con cemento P 304	1.6-2.3	base bituminosa P 201	1.2-1.6
s.base de agregado triturado P209	1.4-2.0	base tratada con P 304	1.2-1.6

Nota: Para profundizar más en el tema de capas de sub-base y base puede consultarse "Mecánica de suelos en vías terrestres, Alonso y Rico" y "Estructuración de vías terrestres, Fernando Olivera Bustamante"

5.3 DISEÑO DE ESPESORES.

Como se mencionó en el capítulo 1, la O.A.C.I. en la actualidad es más que nada un organismo que regula mediante normas y métodos recomendados la aviación internacional con el fin de unificar los criterios de dicha actividad. En el caso de diseño de pavimentos, las autoridades de cada país y sus proyectistas tienen la libertad de utilizar el método de diseño que prefieran. Existen actualmente diversas metodologías bien fundamentadas y que han dado buenos resultados en los lugares en que se han aplicado".

sin embargo, en el presente trabajo se tratará el tema mediante los criterios de diseño de la F.A.A., debido a que su aplicación a nivel internacional es más frecuente.

CONSIDERACIONES PREVIAS.

Antes de poder comenzar con el diseño es necesario hacer una inspección y reconocimiento del terreno sobre el cual se construirán los pavimentos de los diferentes elementos que comprende la zona aeronáutica para conocer las propiedades mecánicas del suelo y en base a ello pronosticar su futuro comportamiento, lo que nos servirá para lograr un diseño óptimo.

De ser posible, es recomendable realizar un examen detallado de los pavimentos existentes en la zona con la finalidad de poder detectar algún comportamiento típico debido a la geología regional, deberá realizarse un estudio geológico en el sitio para determinar posibles zonas de falla en el lugar o alguna otra irregularidad.

Deberán también, llevarse a cabo sondeos y pruebas "in situ" para determinar las posibles variaciones en los materiales, sus propiedades mecánicas, contenido de humedad, nivel freático, etc.

* Canadá, Francia e Inglaterra tienen sus métodos propios de diseño y pueden consultarse en el documento 9157-AN/901, parte 3. pavimentos, O.A.C.I.

Será necesario un estudio de las características de drenaje del terreno para determinar hasta que punto dicho factor podría representar un problema en el futuro y en base a eso plantear soluciones antes de iniciar el diseño del pavimento.

Habrá también que evaluar la calidad de los materiales conocidos como "pétreos" o "agregados áridos" que se emplearán en la construcción de bases y sub-bases, para lo cual deberemos hacer pruebas a

los materiales de los bancos de préstamo a los que se recurrirá .

Antes de comenzar con el método de diseño de espesores , se comentarán brevemente los conceptos del CBR, la determinación del módulo de reacción del suelo de cimentación "k" y de la resistencia a flexión del concreto , para poder describir y ejemplificar el método de diseño .

INDICE DE PENETRACIÓN CALIFORNIA .

El CBR (California bearing ratio) es un índice que se determina mediante una prueba de penetración por compresión uniforme aplicada al suelo, la fuerza necesaria para producir una penetración dada en el material en estudio se compará con la fuerza requerida para producir la misma penetración en una roca caliza machacada y normalizada de California y el índice se expresa como la relación entre las 2 fuerzas .

Por lo tanto el resultado de un material con un CBR de 25, significa que dicho material tiene un 25 % de la resistencia a la penetración que tiene la piedra caliza machacada . Los ensayos en laboratorio del CBR se llevan a cabo con material extraído del lugar de interés y otros con el peso específico que alcanzará durante la construcción . Puede también efectuarse el ensayo con condiciones especiales para conocer su comportamiento futuro , por ejemplo , con el material saturado . El procedimiento de los ensayos en laboratorio aparece en la norma ASTM D-1853 y para los ensayos " in situ " en la norma (MS-10 , the asphalt institute). Los ensayos de CBR para grava suelen dar resultados bastante altos debido a la confinación del material por el molde , la asignación del CBR para materiales de grava puede hacerse también por experiencia y utilizando las siguientes relaciones .

Denominación	Descripción	Límite (L2)	Número (L3)	Valor Límite (L4)	Valor Límite (L5)	Material (L6)	Medida (L7)	Compresión (L8)	Características (L9)	Equivalente (L10)	Peso (L11)	CBR (L12)	Módulo de Elasticidad (L13)
Barridos de Grava gruesa	OV	Grava a grava gruesa	Enteros	Bueno	Mucho	Muchos huecos muy ligeros	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	OP	Grava a grava gruesa con 10% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	OU	Grava a grava gruesa con 20% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	110-125	50-60	300-400	
	OU	Grava a grava gruesa con 30% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	100-115	40-50	300-400	
	OC	Grava a grava gruesa con 40% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	90-105	30-40	200-300	
	SW	Grava a grava gruesa con 50% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	80-95	20-30	200-300	
	SP	Grava a grava gruesa con 60% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	70-85	10-20	200-300	
	SA	Grava a grava gruesa con 70% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	60-75	10-20	200-300	
	SA	Grava a grava gruesa con 80% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	50-65	10-20	200-300	
	SA	Grava a grava gruesa con 90% de arena	Bueno	Mucho	Muchos huecos	Muchos huecos	Cabeza	Enteros	Trayecto de 10' con 100% de huecos	40-55	10-20	200-300	
Barridos de Grava fina	ML	Limo fino grueso con 10% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	ML	Limo fino grueso con 20% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	110-125	50-60	300-400	
	ML	Limo fino grueso con 30% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	100-115	40-50	300-400	
	ML	Limo fino grueso con 40% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	90-105	30-40	200-300	
Barridos de Grava mediana	MS	Limo mediano con 10% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	MS	Limo mediano con 20% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	110-125	50-60	300-400	
	MS	Limo mediano con 30% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	100-115	40-50	300-400	
	MS	Limo mediano con 40% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	90-105	30-40	200-300	
Barridos de Grava gruesa	MS	Limo grueso con 10% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	MS	Limo grueso con 20% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	110-125	50-60	300-400	
	MS	Limo grueso con 30% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	100-115	40-50	300-400	
	MS	Limo grueso con 40% de arena	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	90-105	30-40	200-300	
Turbo a grava gruesa	MS	Turbo a grava gruesa	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	120-140	60-80	300-400	
	MS	Turbo a grava gruesa	Medio	Medio	Medios huecos	Medios huecos	Medios	Medios	Trayecto de 10' con 100% de huecos	110-125	50-60	300-400	

Fuente: Doc 9157-AN/901, parte 3, pavimentos, cap. 3

Sin embargo, el mejor modo de obtener el CBR de laboratorio en varios puntos del terreno.

Para profundizar en la teoría del CBR, su obtención en laboratorio y los criterios para planear series de sondeos en grandes áreas, puede consultarse "Mecánica de suelos II, Juárez Badillo, 1992"

ENSAYOS CON PLACA DE CARGA.

Debido a que el funcionamiento estructural de los pavimentos de concreto hidráulico se basa en que no habrá deformaciones por la gran rigidez de la losa, es necesaria la existencia de una capa subrasante o suelo de cimentación con resistencia a la deformación, homogénea y suficiente para que la losa tenga un apoyo uniforme. La prueba con placa de carga, mide la resistencia a la deformación del suelo de cimentación o de la capa subrasante (según sea el caso) expresada con un valor K que es el índice de deformación en unidades de presión sobre longitud. El valor K puede interpretarse como la presión requerida para producir una deformación unitaria de una placa de carga sobre la capa del material en estudio. Este ensayo está reglamentado en la norma (AASHTO T222). Para realizar esta prueba, se coloca una serie de placas de diferente diámetro cuya finalidad es que la capa inferior no sufra flexiones debidas a la concentración de la carga al centro de la placa y que la presión que soporte el terreno sea uniforme.



Sobre la placa superior se coloca una carga tal, que la presión que se transmite a la placa inferior sea de 0.7 kg/cm^2 , alrededor de la placa base se colocan por lo menos 3 extensómetros para medir la deformación producida, finalmente el módulo de reacción es igual a la relación de la presión

proporcionada entre el promedio de las deflexiones medias .

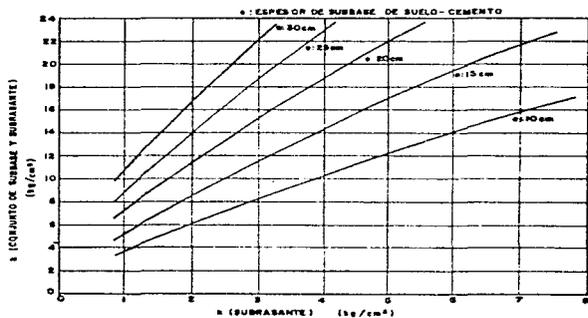
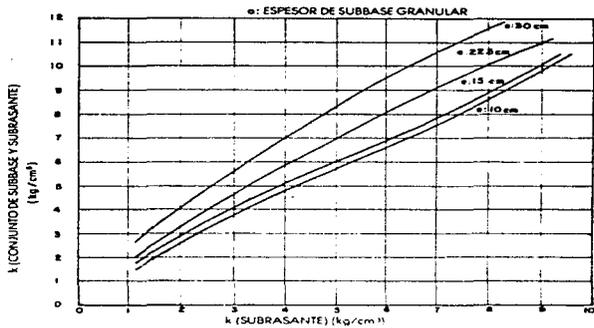
$$\text{Módulo de reacción} \quad 3 \\ \mathbf{K = P / \delta = 0.7 / \delta \quad (Kg/cm^3)}$$

donde: δ
P = presión (kg/cm²)
 δ = promedio de las deflexiones debidas a la deformación del terreno (cm)

El conjunto de subrasante (si la hay) y sub-base nos darán un módulo de reacción K mayor al del terreno natural que estará en función del módulo K de subrasante y el espesor y calidad de la sub-base o base. Para saber con que espesor podemos esperar un determinado nivel de reacción del conjunto, se han preparado las gráficas que aparecen a continuación, la primera se utiliza cuando la base se construye solo con materiales granulares y la segunda cuando la base se ha mejorado con cemento portland.



En la foto superior puede apreciarse el espesor del pavimento de concreto hidraulico de la plataforma remota del A.T.C.M.



Fuente: Estructuración de vías terrestres, Fernando Olivera Bustamante, C.E.C.S.A.

Nota: La O.A.C.I. recomienda que en ningún caso el valor de K que se utilice para el cálculo del pavimento exceda de 500 lb/in³ (13.82 kg/cm³)

RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA FLEXIÓN.

El espesor requerido de las losas de concreto para pavimentos rígidos, esta relacionado con la resistencia del material a la tensión ya que es el principal esfuerzo al que estarán sometidas las losas en las juntas, para determinar dicha resistencia debe utilizarse el ensayo de la norma ASTM-C78.

El parámetro de resistencia del concreto a la tensión es el módulo de ruptura " MR " que se obtiene de la prueba de tensión por flexión que consiste en llevar a la ruptura una viga de sección cuadrada que ha recibido un tratamiento de curado por 28 días, la sección de dicha viga es de 15 cm por lado y su longitud de 60 cm.

La carga se aplica en 2 puntos de la parte superior de la viga que se coloca horizontalmente y esta soportada por 2 apoyos en los tercios de la parte inferior, el módulo de ruptura se calcula mediante la siguiente expresión.

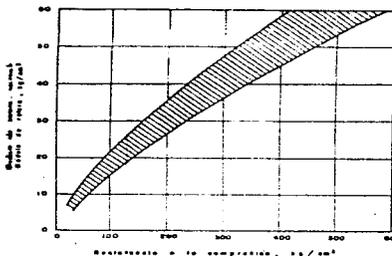
$$MR = PL/bd^2 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

donde:

P = carga de ruptura
L = distancia entre
apoyos inferiores
b = ancho de la viga
d = peralte de la viga

En la sig. gráfica aparece una correlación entre el módulo de ruptura y la resistencia a la compresión a 28 días cuyos resultados son fiables y podrían utilizarse para el cálculo. Sin embargo, siempre será mejor realizar las pruebas en laboratorio

y verificar con la gráfica o utilizarla a nivel de anteproyecto .



Nota: esta gráfica ha sido tomada el libro "Estructuración de vías terrestres , Fernando Olivera Bustamante , CECSA"

Por último hay que mencionar que las gráficas que se presentarán más adelante (en el subtema de "cálculo de pavimentos rígidos ") para el diseño de espesor de las losas de pavimento que entre otras cosas depende del módulo de ruptura " MR " , se elaboraron mediante pruebas de tensión por flexión a vigas de concreto curado por 90 días (Doc. 9157-AN/901 , O.A.C.I.) y la gráfica anterior se realizó en base a pruebas de vigas de concreto curado a 28 días , sin embargo , el proyectista puede utilizarlas simultáneamente si toma en cuenta que la resistencia a tensión del concreto curado por 90 días será en general mayor que la resistencia alcanzada a los 28 días en un 10 % , (Pavimentos de concreto , Correlación , IMCYC) .

CRITERIO DE DISEÑO DE LA F.A.A.

El criterio adoptado por la F.A.A. en el diseño de los espesores del pavimento es tratar el cálculo de los trenes de aterrizaje de los aviones y el cálculo y evaluación de los espesores de manera separada, las curvas de cálculo de espesores que se presentarán más adelante para pavimentos flexibles se basan en el método CBR y en un análisis de tensiones en los bordes de las juntas para las gráficas de pavimentos rígidos.

El método de cálculo del CBR es básicamente empírico y relaciona las diferentes configuraciones de los trenes de aterrizaje utilizando conceptos teóricos sobre su similitud, las curvas de cálculo proporcionan el espesor total requerido por los pavimentos flexibles, es decir, carpeta, base y sub-base necesarios para soportar el peso del avión de diseño con una frecuencia pronosticada, sobre un terreno específico y para una determinada vida útil.

Las curvas de cálculo para pavimentos rígidos que se presentarán se basan en el análisis de Westergaard * de las cargas en los bordes, considera una reducción del 25 % de las cargas en los bordes de las losas. Para tomar en cuenta la transferencia de cargas por las juntas y el fenómeno de fatiga del pavimento, se convierte el "tráfico" en "cobertura" que es la medida del número de aplicaciones de tensiones máximas que ocurren dentro de la losa del pavimento debido al tránsito sobre ellas.

Es importante mencionar que la construcción deficiente y/o una ausencia de mantenimiento preventivo, harán que un pavimento falle aun cuando el diseño sea óptimo.

CONSIDERACIONES RESPECTO A LOS AVIONES.

El método de cálculo del pavimento esta basado en el peso bruto del avión de diseño (peso máximo

de despegue) y se supone que el 95 % de dicho peso es soportado por el tren de aterrizaje principal y el 5 % por el tren de proa .

Por otra parte el tipo de tren de aterrizaje y su configuración determinan de que modo se distribuye el peso del avión en el pavimento y establecen la respuesta del pavimento a las cargas producidas por el avión , de manera que el método requiere que una vez elegido el avión de diseño las operaciones de los demás aviones se tomen en cuenta mediante una equivalencia a operaciones del avión de diseño .

CONFIGURACIONES DEL TREN DE ATERRIJAJE .

DISTRIBUCION DEL PESO



TREN PRINCIPAL



HUELLAS DE TREN SIMPLE



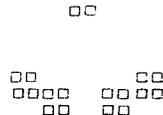
HUELLAS DE TREN DOBLE (GEMELAS)



HUELLAS DE TREN DOBLE-TANDEM



HUELLAS DE TREN 2 . DOBLE-TANDEM



Debe hacerse una consideración especial para los aviones de fuselaje ancho como el B-747 , el DC-10 y el L-1011 ya que la geometría de la

sus trenes de aterrizaje es diferente y de mayor cubrimiento (más ancho) , por lo tanto se han preparado gráficas para cálculo de espesores especiales para cada uno de estos aviones , las cuales deberán utilizarse en caso de que alguno de ellos resulte ser el avión de diseño , sin importar el tipo de tren que tenga .

A partir de los estudios de planeación deberá hacerse un pronóstico del número de operaciones que se realizarán anualmente así como de la proporción y el tipo de los diferentes aviones que compondrán la flota , ya que serán los datos para el diseño de los espesores del pavimento.

El pronóstico de operaciones anuales para cada tipo de avión dará como resultado una lista de varios aviones entre los cuales hay que elegir el avión de diseño , que será aquel que requiera mayor espesor de pavimento para su propio número de operaciones y según sus propias curvas de cálculo de espesores . De manera que a diferencia del avión de diseño para los anchos y separaciones de calles de rodaje y plataformas , el avión de diseño para el cálculo de espesores , no es necesariamente el avión más grande de la flota .

Una vez determinado el avión de diseño y dado que el pronóstico de la flota es una variedad de aviones que posee diferentes tipos de tren de aterrizaje y diferentes pesos habrá que convertir las operaciones de cada tipo a operaciones equivalentes a las del avión de diseño para lo cual se deberá utilizar los siguientes factores de conversión .

PARA CONVERTIR DE:

A:

MULTIPLIQUENSE LAS
SALIDAS POR:

RUEDA SIMPLE	DOBLE	0.8
RUEDA SIMPLE	DOBLE TANDEM	0.5
DOBLE	DOBLE TANDEM	0.8
2 x DOBLE TANDEM	DOBLE TANDEM	1.0
DOBLE TANDEM	RUEDA SIMPLE	2.0
DOBLE TANDEM	DOBLE	1.7
DOBLE	RUEDA SIMPLE	1.3
2 x DOBLE TANDEM	DOBLE	1.7

NOTA: EL TREN DOBLE TANDEM SE CONOCE COMO DOBLE Y EL DOBLE COMO RUGEMELAS

Habiendo ya agrupado los aviones dentro de la misma configuración de tren de aterrizaje, la conversión a salidas anuales equivalentes del avión de diseño debe determinarse según la sig. expresión:

$$\log R1 = \log R2 \times \left[\frac{1/2}{\sigma_1 / \sigma_2} \right]$$

DONDE:

$R1$ = SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES DEL AVION DE DISEÑO

$R2$ = SALIDAS ANUALES DE ALGUN AVION EN ESTUDIO

σ_1 = CARGA SOBRE LA RUEDA DEL AVION DE DISEÑO

σ_2 = CARGA SOBRE LA RUEDA DEL AVION EN ESTUDIO.

La expresión anterior representa una norma relativa que compara diferentes aviones con un avión común de diseño, como los aviones de fuselaje ancho poseen trenes de aterrizaje diferentes, requieren un tratamiento especial que consiste en considerar dichos aviones como un avión de tren 2 x doble tandem, de 300 000 lb (136 100 kg), al calcular las salidas anuales equivalentes y después el cálculo debe continuarse con la curva correspondiente al avión de diseño.

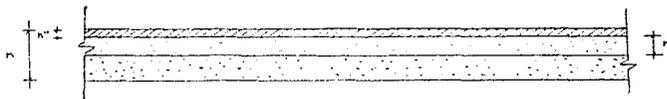
CÁLCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Como se mencionó al principio de este capítulo, el pavimento flexible consta básicamente de la carpeta, base, sub-base (opcional) y suelo de cimentación, por lo que para utilizar las curvas de cálculo requeriremos el CBR del suelo de cimentación, del material de base y sub-base, el peso máximo de despeque del avión de diseño y el número de salidas anuales totales de dicho avión, es decir, su número anual de salidas más las salidas equivalentes de todos los demás aviones.

SECCIÓN

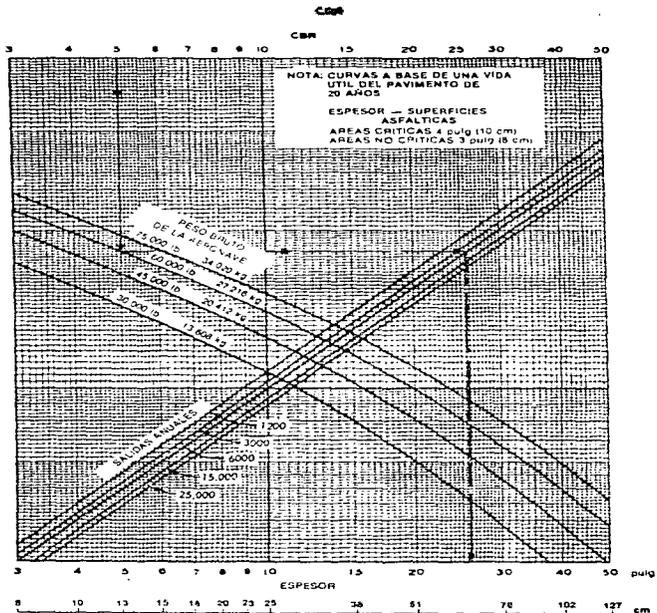


Las curvas que se presentan a continuación, indican el espesor total del pavimento requerido y el espesor de la carpeta asfáltica, es decir, que nos darán las variables h , h' y h'' que se indican en la sección longitudinal siguiente.

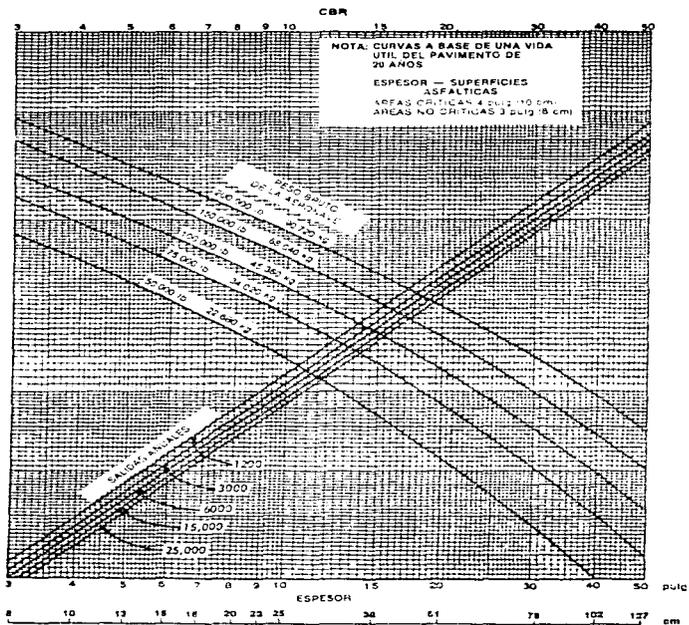


Mediante el uso de las gráficas de las páginas siguientes pueden obtenerse los espesores de base, sub-base y carpeta en función del CBR de los materiales, de los pesos de operación máxima y del número de operaciones anuales que realiza cada tipo de avión. Las gráficas se tomaron del doc. 9157, parte 3, O.A.C.I. y solo se muestran las más representativas para ilustrar lo dicho anteriormente. Además servirán para realizar un ejemplo de diseño.

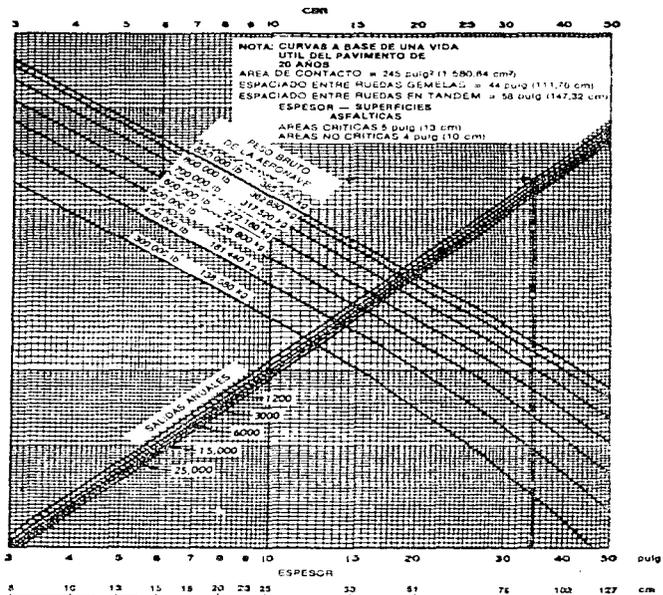
Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de rueda simple.



Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de ruedas gemelas.



Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, B-747-100, SR, 200B

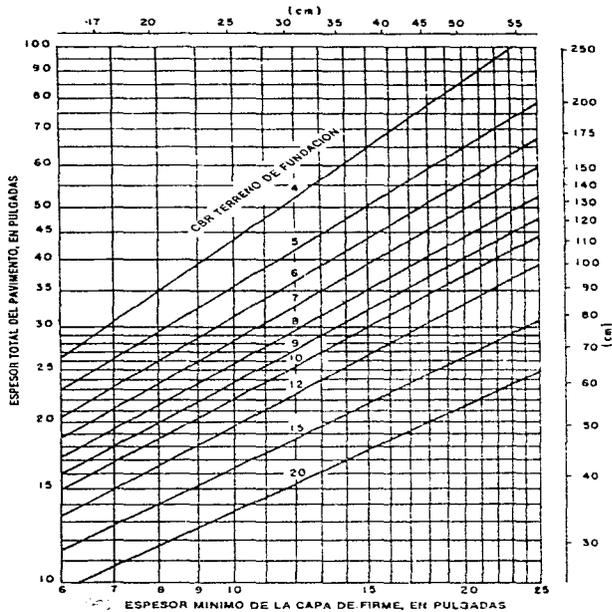


En la siguiente gráfica puede obtenerse el espesor mínimo de la capa de base, para obtenerlo será necesario conocer el CBR del material de la subrasante o suelo de cimentación y el espesor total del pavimento que se obtuvo de las gráficas anteriores.

Ahora bien, de las gráficas anteriores se obtuvo h , h' y h'' con lo que el espesor de sub-base queda definido pero mediante la gráfica de espesor mínimo para base "B" debemos revisar el espesor determinado con las gráficas anteriores $h' - h''$.

En caso de que $h' - h'' > \epsilon$ se quedará el espesor de base determinado como $h' - h''$.

En el caso de que $h' - h'' < \epsilon$ se quedará el espesor de base ϵ determinado con la gráfica de corrección.



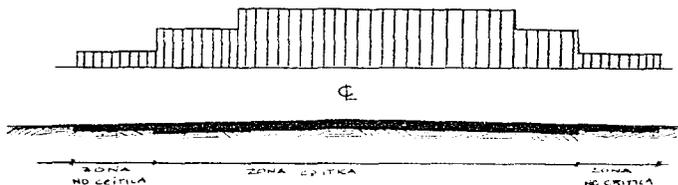
Nota: El modo de uso de cada gráfica aparece señalado en las gráficas mediante flechas.

Fuente: Doc. 9157-AN/901, parte 3, pavimentos, cap. 3

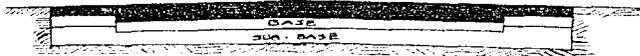
Debido a que la mayoría de los cubrimientos de los aviones se realizan en una franja central de la pista más o menos definida, es posible disminuir el espesor del pavimento en los extremos de la misma con el fin de disminuir su costo.

ÁREAS CRÍTICAS Y NO CRÍTICAS

Las curvas de cálculo anteriores nos indican el espesor total del pavimento y de la carpeta asfáltica en áreas que debido a su mayor número de repeticiones o cubrimientos se consideran críticas.



Para las zonas no críticas los espesores de todas las capas se multiplicarán por 0.9 para calles de rodaje de salida y por 0.7 para orillas de pista. Además habrá una reducción en el espesor de la carpeta que se especifica para dichas zonas en las gráficas anteriores. En las secciones de transición la reducción deberá aplicarse sólo a las capas interiores manteniendo el espesor de la carpeta, en ningún caso deberán hacerse reducciones a menos del 70% de los espesores calculados para las capas interiores de las zonas críticas.



CÁLCULO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Para el cálculo de los pavimentos rígidos también se han preparado curvas similares a las anteriores, existen entonces diferentes curvas para los diferentes tipos de tren y curvas separadas para los aviones de fuselaje ancho, las curvas requieren para su uso los siguientes datos: resistencia del concreto a la flexión módulo del terreno de fundación k , peso bruto del avión de cálculo y número de salidas anuales, cada uno de estos conceptos ha sido tratado anteriormente.

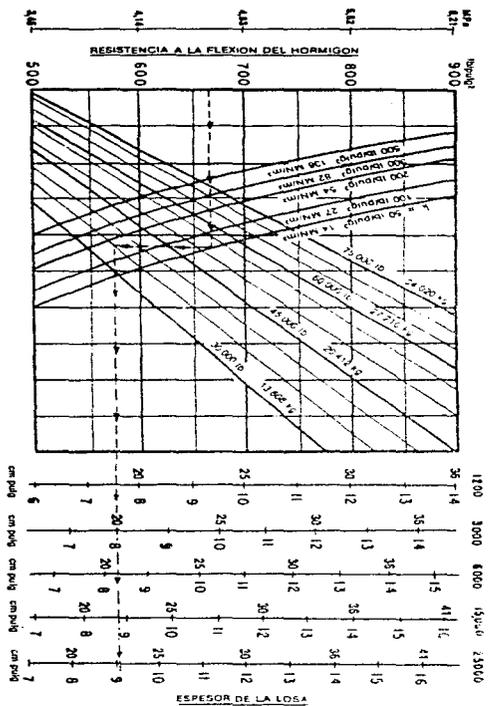
Las curvas de cálculo de espesores indican solamente el espesor de la losa de concreto, las demás cargas del pavimento se determinarán por separado.

Como ya se había mencionado antes, el objeto estructural de la base en un pavimento rígido es el de proporcionar un apoyo estable y uniforme a las losas más que el de soportar cargas como en el caso de los pavimentos flexibles, debido a la gran rigidez de las losas que por lo tanto no transmiten deformaciones a al base.

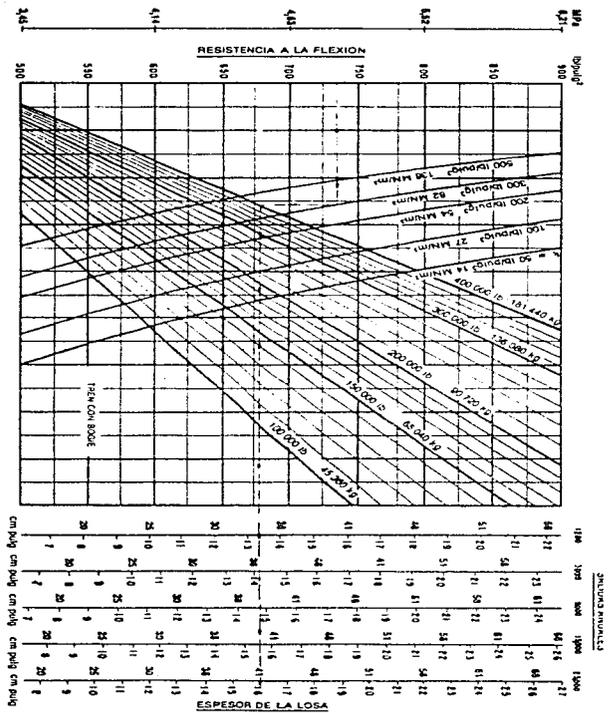
Se recomienda entonces la construcción de una capa de base con espesor de 4 in (10 cm).



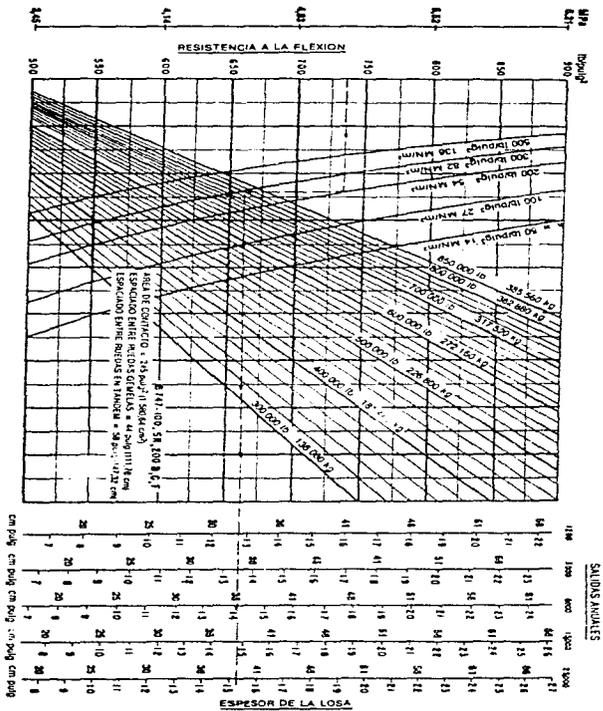
A continuación se presentan las curvas antes mencionadas para determinar el espesor h de la losa de concreto. Se presentan solo las gráficas más representativas y su uso se indica mediante flechas en cada una.



Curvas de cálculo de pavimentos rígidos, tren de rueda simple.



Curvas de cálculo de pavimentos rígidos, tren de bogie.



Curvas de cálculo de pavimentos rígidos, B-747-100, SR, 200 B

Además, la construcción de pavimentos rígidos conlleva tanto por función como por proceso constructivo la necesidad de juntas entre las losas.

Las juntas de contracción tienen el propósito de inducir el agrietamiento perpendicularmente al eje de la pista o calle de rodaje y así garantizar el trabajo conjunto de las losas, las juntas se harán a distancias predeterminadas en el proyecto. En un pavimento rígido de concreto simple se debe tener una relación largo/ancho de las losas menor de 1.25, siendo común el valor de 1.15, la longitud usual es 4.5m

Las grietas se inducirán haciendo ranuras en las losas, estas ranuras se hacen aserrando la parte superior de la losa a una profundidad mínima de 5 cm y con un ancho de 4 a 6 mm, utilizando para ello discos de diamante o de tungsteno.

Quando la relación largo/ancho es mayor de 1.25 pero menor de 1.4 deberán utilizarse pasajuntas de sujeción que pueden ser varillas corrugadas que se colocarán bajo las ranuras antes mencionadas y perpendiculares a estas.

Los pasadores se colocan a la mitad del espesor de la losa y deben anclarse 40cm hacia cada losa, la separación entre pasajuntas es función del espesor de la losa, se colocarán en su posición antes del colado sostenidos por silletas, el diámetro adecuado de las varillas y su separación puede obtenerse de las gráficas que aparecen al final de la descripción de las juntas.

Para relaciones largo/ancho mayores de 1.4, la losa requerirá armado continuo que puede ser un emparrillado de varilla o una malla metálica colocada al centro del espesor de la losa.

Las juntas de dilatación tienen la finalidad de evitar esfuerzos de compresión al chocar con algún objeto cercano al pavimento (rocas etc.) al dilatarse el concreto, existen 2 tipos, juntas a tope ó con pasajuntas para transmitir las cargas, para las juntas a tope se dejan espacios de 2 a 4cm que pueden rellenarse con cartón ó fibras asfálticas, en el caso

de de los pasajuntas, su cálculo es igual al de las juntas por contracción.

Las juntas constructivas se colocan entre el colado de un tramo y otro según el procedimiento constructivo que se este utilizando ó cuando por algún imprevisto se suspende el colado, en estos casos deberá terminarse el colado formando una sección vertical lisa en la que se insertarán varillas corrugadas con anclajes de 40cm para evitar la aparición de grietas y transmitir carga aunque la junta de contracción no coincida y por lo tanto no se vaya a aserrar esa sección.

Además, las losas lateralmente deben tener una junta constructiva macho-campana ó de visagra a lo largo de toda su longitud por lo que los extremos laterales deberán cimbrarse de modo que esa losa reciba el colado lateral posteriormente.

AREAS CRÍTICAS Y NO CRÍTICAS.

Al igual que en el caso de pavimento flexible, el espesor de la capa de rodadura que en este caso es la losa puede reducirse en las zonas no críticas, es decir, donde se prevé un menor número de cubrimientos, para estas zonas no críticas el espesor de la losa será del 90% en calles de rodaje de salida y del 70% en pistas. Las transiciones serán graduales entre las 2 zonas y el espesor de base aumentará según se reduzca el de la losa. A continuación se realizan ejemplos de diseño de espesores para aplicar el método y mostrar el modo de uso de las gráficas mostradas.

EJEMPLOS DE DISEÑO.

Primeramente se hará un ejemplo de determinación de salidas equivalentes y ya con este dato y suponiendo las demás condiciones necesarias, se realizará el cálculo de los espesores para un pavimento flexible y posteriormente para uno rígido, a continuación aparece la tabla de tráfico previsto.

AVIÓN	TIPO DE TREN	SALIDAS ANUALES PREVISTAS	PESO MÁX. DE DESPEQUE (lb)	(kg)
727-100	DOBLE	3 760	160 000	7 260
727-200	DOBLE	9 080	190 500	86 500
707-320B	DOBLE TÁNDEM	3 950	327 000	48 500
DC-9-30	DOBLE	5 800	108 000	49 000
CV-880	DOBLE TÁNDEM	400	184 500	83 945
737-200	DOBLE	2 650	115 500	52 448
L-1011-100	DOBLE TÁNDEM	1 710	450 000	204 120
747-100	2X DOBLE TÁNDEM	85	700 000	317 800

Ahora a partir de los datos de la tabla anterior calcularemos utilizando las gráficas, el espesor total del pavimento flexible para cada tipo de avión, lo que nos permitirá definir el avión de diseño, se consideró un CFR = 8 para el suelo de cimentación.

AVIÓN	TIPO DE TREN	ESPESOR TOTAL DEL PAVIMENTO (in)
727-100	DOBLE	25
727-200	DOBLE	32
707-320B	DOBLE TÁNDEM	31
DC-9-30	DOBLE	22
CV-880	DOBLE TÁNDEM	21
737-200	DOBLE	23
L-1011-100	DOBLE TÁNDEM	29
747-100	2X DOBLE TÁNDEM	30

De la tabla anterior podemos ver que para el peso y número de salidas de cada avión, el pavimento de mayor espesor es el requerido por el 727-200 que, por lo tanto, será el avión de diseño.

El siguiente paso es convertir todas las salidas de los aviones a salidas equivalentes del avión de diseño, lo cual se hará mediante la fórmula logarítmica:

$$\log B_2 = \log B_1 (W_2/W_1)$$

DONDE: W_1 Peso por rueda del avión 727-200

que se estudió anteriormente, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

AVIÓN	SALIDAS CON TRES DOBLE (B2)	CARGA POR RUEDA (W1) (lb)	(kg)	CARGA POR RUEDA (W2) (lb)	(kg)	SALIDAS ANUALES EQUIV. PARA EL AVIÓN DE DISEÑO (B1)
727-100	3760	38 000	17 240	45 240	20 520	1891
727-200	9 080	45 240	20 520	45 240	20 520	9 080
707-320B	5 185	38 850	17 610	45 240	20 520	2764
DC-9-30	5 800	25 650	11 630	45 240	20 520	632
CV-990	680	21 910	9 940	45 240	20 520	84
737-200	2 650	27 430	12 440	45 240	20 520	463
747-100	145	35 625	16 180	45 240	20 520	63
L-1011-100	2 907	35 625	16 180	45 240	20 520	1184
TOTAL						16241

OBSERVACIONES: Las cargas por rueda en los aviones de fuselaje ancho, se considerará como la carga por rueda de un avión que pesa 300,000 lb (136,000 kg) para el cálculo de salidas anuales equivalentes.

* Las salidas con tren doble para aviones con diferente configuración de tren de aterrizaje se determinan multiplicando su número real de salidas por 1.7 según lo expuesto en el subtema anterior "consideraciones respecto a los aviones"

* Como el total de salidas equivalentes es de 16241 se ha redondeado la cantidad para continuar el diseño con 16000

EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESPESORES PARA PAVIMENTO FLEXIBLE.

Para desarrollar el sig. ejemplo se tomaron datos del ejemplo anterior y otros se han supuesto.

Datos:

CBR de subrasante :	5	(del ej. anterior)
CBR de sub-base:	75	(supuesto)
salidas anuales del avión de diseño:	16 000	(del ej. anterior)
peso máximo de despegue:	190 500 lb	(86500 kg)

Utilizando la gráfica de curvas para la determinación del espesor de pavimento flexible para tren doble (ruedas gemelas) tenemos:

Espesor a = 33.5" (85 cm)
 Espesor b = 15" (38 cm)
 Espesor c = 4" (10 cm)

Por lo tanto el espesor de sub-base es:
 a - b = 18.5" (47 cm)

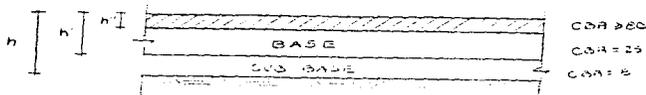
El espesor de base queda:
 b - c = 11" (28 cm)

Por último, el método indica que se debe revisar el espesor de base mediante la gráfica de espesor mínimo E_{min} , cuya gráfica es la última de las gráficas anteriores y de la cual se obtuvo:

$E_{min} = 14"$ (35.5 cm)

Como el valor de espesor mínimo obtenido con esta última gráfica es mayor que el valor que se había determinado para la base de la diferencia a - c, se hará una corrección aumentando el espesor de base a 14" (35.5 cm) y disminuyendo el espesor de sub-base a 15.5" (39.5 cm) de manera que el espesor

total del pavimento no se modificará. El sig. esquema muestra mediante un corte los espesores que se determinaron para el pavimento en zona crítica y para una vida útil de 20 años.



NOTA: En áreas no críticas podemos reducir el espesor de la carpeta a 3" (8cm) con el correspondiente aumento en el espesor de la base en dichas zonas, las posibles disminuciones se indican en las gráficas para cálculo de espesores correspondientes a los diferentes aviones.

En caso de estabilizar las bases pueden reducirse los espesores determinados mediante los coeficientes vistos en el sub-tema "bases y sub-bases"

EJEMPLO DE CÁLCULO PARA ESPESORES DE PAVIMENTO RÍGIDO.

Para pavimentos rígidos, el cálculo del espesor de la losa se hace también mediante curvas correspondientes al tren de aterrizaje del avión de diseño o a la del propio avión según se vió anteriormente. Los sig. datos se tomaron del ejemplo anterior y los módulos de reacción "k" para base y sub-rasante (suelo de cimentación) se obtuvieron mediante la relación entre CBR y módulo "k" que aparece en la sig. página, de manera que se esta trabajando con el mismo diseño y con los mismos materiales a fin de poder hacer una comparación entre los 2 sistemas posteriormente.

DATOS:

Tipo de avión:	B727-200
Tipo de tren de aterrizaje:	Doble (R.gemelas)
Peso máximo de despegue:	190 500 lb (86 500 kg)
No. de salidas anuales:	16 000

K de subrasante: 100 lb/in (2.76 kg/cm)
K de base: 300 lb/in (8.29 kg/cm)
 supondremos una base estabilizada
n = 650 lb/in (45.64 kg/cm) Es el módulo de tensión del
 concreto "MR" que se trató antes.

De la gráfica que aparece para bases estabilizadas en las páginas anteriores, se determinó un espesor de 10.5" (27 cm)

El espesor de la losa según la gráfica para trazo doble y pavimento rígido queda:

Espesor para 15000 salidas anuales 16.5" (42 cm)
 Espesor para 25000 salidas anuales 17.2" (43.6 cm)

Interpolando el espesor para 16000 salidas anuales resulta 16.6", por facilidad constructiva 16.5" (42 cm)



5.4 RELACIÓN CON LA LONGITUD DE PISTA.

La longitud de pista se determina en base a la clasificación y las masas máximas de despegue de los aviones que van a operar en el aeropuerto (vease 2.3).

Lo anterior, se debe entre otras cosas a que a mayor masa, el avión requerirá mantener una velocidad más alta previa al aterrizaje, que le proporcione la fuerza ascendente necesaria para sustentar su propio peso. De manera que al aterrizar con velocidades más altas (véase la tabla de velocidades sobre el umbral en función de la clasificación, 3.1) se requerirá mayor longitud de pista para lograr frenar los aviones.

También, durante la carrera de despegue, los aviones de mayor masa requerirán mayor longitud de pista para poder iniciar el vuelo. Lo que hace necesario, que las pistas de mayor longitud tengan pavimentos diseñados para soportar mayores cargas.

Por otro lado, durante el desarrollo del aeropuerto se tendrán diferentes tipos predominantes de aviones operando, de manera que en las primeras etapas del desarrollo, se operarán aviones con masas medias que requerirán pistas no mayores de 2500 m y por lo tanto pavimentos con resistencia adecuada para soportar esas masas, cuyos espesores no estarán de acuerdo con los espesores requeridos por el pavimento en etapas futuras del desarrollo del aeropuerto, ya que, al incrementar la longitud de pista también deberá incrementarse la resistencia del pavimento aumentando sus espesores, pero no solo en la ampliación sino en toda la longitud de pista, pues de lo contrario se provocaría un seccionamiento del pavimento de la pista debido a la diferencia de resistencias.

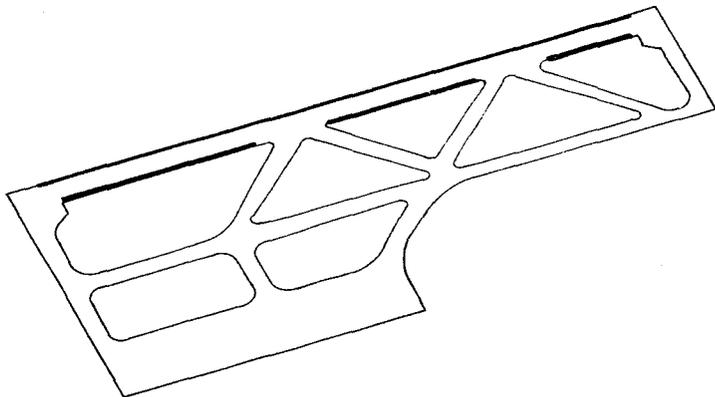
Por lo anterior, será necesario que así como los elementos geométricos de la zona aeronáutica deben ser diseñados en su totalidad desde el principio e irse desarrollando por etapas. El pavimento debe diseñarse y construirse desde el principio, considerando la longitud máxima que pueda alcanzar la pista y la masa máxima de los aviones que puedan llegar a operar. Por lo tanto, deberá efectuarse un análisis en base a los estudios de planeación para considerar las posibles

características del tránsito futuro y relacionarlo con el comportamiento del pavimento y su vida útil.

Aunque en las primeras etapas del desarrollo del aeropuerto, el pavimento estuviera sobrediseñado, en realidad, es preferible realizar la inversión que requiere el espesor total desde el principio comparado con la dificultad técnica y constructiva que representaría el proyecto de recrecimiento de pavimento, y su adecuación a la resistencia del nuevo pavimento de la ampliación cuando se requiriera incrementar la longitud de pista, que además provocaría mayores costos.

En cuanto a los pavimentos de calles de rodaje y plataformas, deberán tener la misma resistencia que el de la pista, ya que aunque no tendrán la misma intensidad de tránsito que la pista, soportarán las cargas debidas a los movimientos de los aviones pero aplicadas lentamente, por lo que causarán mayor daño estructural al pavimento que los cubrimientos rápidos que se hacen en las pistas.

Podremos entonces, considerar como zonas de pavimento no críticas únicamente a los extremos laterales de las pistas con excepción de las cabeceras.



Zonas no críticas para el
pavimento XXXXXXXXXX

Planta de la zona aeronáutica de un aeropuerto .

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Solo mediante la correcta planeación en cada etapa del desarrollo de un aeropuerto, será posible proyectar y construir una infraestructura capaz de cubrir las necesidades del transporte aéreo ante sus requerimientos cambiantes, impuestos por el crecimiento urbano, el desarrollo aeronáutico y las condiciones económicas durante su vida útil.

El análisis de los espacios aéreos, para cada proyecto aeroportuario en particular, es un factor determinante de la capacidad del futuro aeropuerto para poder operar aviones de mayores dimensiones o con diferentes características de funcionamiento, y por lo tanto, también de su capacidad de crecimiento. Por lo que será conveniente realizar desde el principio dicho análisis para todas las pistas que se pretenda construir o ampliar durante el desarrollo del aeropuerto.

Dada su importancia, deberá revisarse que el sitio elegido para el emplazamiento de un nuevo aeropuerto, cumpla con las superficies limitadoras de obstáculos descritas en el "anexo 14" y además, con que puedan adecuarse procedimientos seguros para las aeronaves de acuerdo con los criterios del doc. PANS-OPS/8168, aún en sus últimas etapas de desarrollo. El incumplimiento de las superficies limitadoras de obstáculos, y más aún, la complejidad de las operaciones o la imposibilidad de algunos aviones para llevarlas a cabo, podría inclusive ser motivo para rechazar una posible localización del aeropuerto.

Sin embargo, en un caso dado deberá preferirse un sitio en el que puedan construirse procedimientos seguros aún cuando no se cumpla totalmente con las superficies horizontales externa e incluso interna que describe el anexo 14.

Las pistas se relacionan estrechamente con los espacios aéreos y los procedimientos, por lo que en base a su

orientación, número y longitud de desarrollo máximo, deberán revisarse los espacios aéreos y las rutas de aproximación y salida. De manera, que el diseño de pista, la revisión de los espacios aéreos y el desarrollo de procedimientos, son procesos que deben retroalimentarse y modificarse entre sí, hasta donde sea posible, para lograr un diseño que permita sencillez y agilidad en las operaciones de las aeronaves.

La capacidad operacional de la pista esta determinada por el tiempo de ocupación por parte de las aeronaves y por la frecuencia de operaciones de los aviones de cada categoría, por lo tanto, el aumento de operaciones de aviones de cada categoría, demandará progresivamente la construcción de sus correspondientes calles de salida rápida para aumentar la capacidad operacional de la pista. Lo que a su vez demandará un crecimiento análogo del sistema de calles de rodaje y plataformas para mantener la eficiencia en las operaciones de toma y abandono de pista, así como en las maniobras para estacionamiento y servicios de plataforma para un mayor número de aeronaves.

Cualquier incongruencia entre la capacidad operacional de los elementos de la zona aeronáutica, provocaría un "cuello de botella" dentro del sistema, que haría que su capacidad operacional real, fuera la del elemento o subsistema más ineficiente. Por lo tanto, será necesario utilizar algún sistema de simulación de operaciones dentro de la zona aeronáutica para serciorarnos de su funcionalidad en todas las etapas de desarrollo del aeropuerto.

Por lo anterior, el plan maestro del aeropuerto debe considerar el desarrollo total de la zona aeronáutica y el de cada uno de sus elementos para preveer y poder contar con el terreno suficiente para las ampliaciones y la colocación de las antenas y equipos de las radioayudas de navegación en el momento que se necesiten.

En el proyecto de pavimentos, es recomendable diseñar desde las primeras etapas del desarrollo de la zona aeronáutica, para la resistencia requerida por el pavimento en la etapa de máximo desarrollo a fin de evitar cambios

bruscos de resitencia y undimientos diferenciales o costosos estudios geotécnicos y procedimientos constructivos para resolver dicho problema.

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.

dB	Decibelio
B	Pie 1 ft = 30.48 cm
NM	Milla Náutica, 1 NM = 1853 m
kt	Nudo 1kt = 1.688 ft/Milla Náutica por Hora
VMC	Condiciones meteorológicas de vuelo visual mph=56 Km/h
Libra	1 lb = 453.592 gr
ASDA	Distancia disponible de aceleración-para
TORA	Recorrido de despegue disponible
ATC	Control de tránsito aéreo
CBR	Índice de resistencia California
DAEH	Altitud altura de desceño
DER	Extremo de salida de pista
EAP	Punto de referencia de aproximación final
FAP	Punto de aproximación final
G/S	Marcaje de pendiente para el descenso (Grade/Slope)
IAE	Punto de referencia de aproximación inicial
ILS	Sistema de aterrizaje por instrumentos
LOC	Localizador del sistema ILS
Mapt	Punto de aproximación travesada
MDA-H	Altitud altura mínima de descenso
MOC	Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos
NBD	Radiofaro no direccional
OCA	Altitud de franqueamiento de obstáculos
OCAH	Altitud altura de franqueamiento de obstáculos
OCTI	Altura de franqueamiento de obstáculos
OPZ	Zona despejada de obstáculos
OIS	Superficie de identificación de obstáculos
PAN-SOPS	Procedimientos para los servicios de navegación aérea-operación de aeronaves
PDO	Pendiente de desceño del procedimiento
RVE	Alcance visual en la pista
LLOL	Pista de aterrizaje y despegue de gran longitud
STOL	Pistas de aterrizaje y despegue de corta longitud
VTOL	Pistas de aterrizaje y despegue vertical
VFR	Reglas de vuelo visual
IFR	Reglas de vuelo por instrumentos
VOR	Radiofaro omnidireccional VHF
VRS	Valor relativo de soporte

BIBLIOGRAFIA

- Planificación y diseño de Aeropuertos, Robert Hoozoeff, 1982
- Aeropuertos, N. Ashraf y Wright, 1983.
- Procedimientos para la navegación aérea, Operación de aeronaves, Doc. 2168, O.A.C.I., 1993.
- Manual de proyectos de aerolíneas, Doc. 9137-AN901, O.A.C.I., 1984.
- Manual de servicios de aeropuertos, Eliminación de obstáculos, O.A.C.I., 1983.
- Anexo 14, Vol. 1, O.A.C.I., 1991.
- Ruido y Estampido Sonoro, Martín Cuesta Álvarez.
- La ingeniería de suelos en las vías terrestres, vol. 1, Alfonso Raco y Herrando del Castillo, Límusa 1992.
- Curso de Pavimentos de Concreto, NRC/C, 1978.
- Mecánica de Suelos, vol. 2, Juárez Bañillo y Raco Rodríguez, Límusa 1992.