

Parabrisas y ventanillas

1. PARABRISAS Y VENTANILLAS

1.1 Las ventanas de los aviones son las aberturas que se practican en el fuselaje para instalar transparencias que permiten la visión exterior.

Las láminas transparentes se unen al fuselaje mediante marco de fijación.

Las ventanas frontales de la cabina de vuelo se llaman parabrisas.

El parabrisas, al igual que las ventanas, consiste en un marco de material elástico donde se aloja el cristal.

Como es natural, los requisitos estructurales del parabrisas son más exigentes que los correspondientes a las ventanillas de la cabina de pasajeros e incluso los laterales de la cabina de mando. Por esta razón se emplea vidrio en los parabrisas mientras que en las ventanillas es normal el empleo de distintos plásticos.

Además de las consideraciones estructurales al uso, el empleo de materiales plásticos en ventanillas (cientos) supone una notable reducción de peso.

Parabrisas

1.2 Durante mucho tiempo los aviones comerciales han utilizado parabrisas formados por una lámina de vidrio templado y una capa gruesa de polivinilo. Esta construcción es lo que viene a llamarse "acristalamiento monocapa".

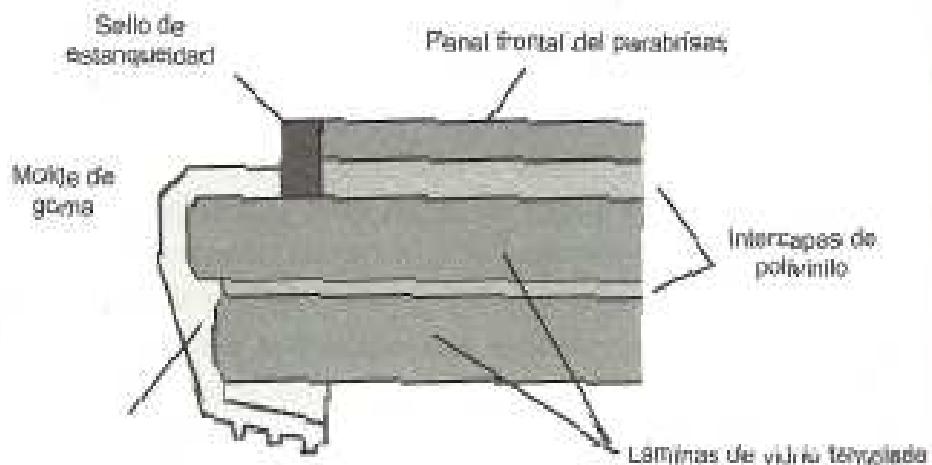
La lámina de vidrio templado soporta las cargas de presurización y de presión dinámica del aire; mientras que la capa de polivinilo actúa como un diafragma, esto es, tiene la función de proporcionar la resistencia mecánica necesaria frente al impacto con aves. La capa de polivinilo constituye también la reserva para soportar las cargas de presurización en el caso de fallo del cristal primario.

Más recientemente, con la llegada de los aviones de fuselaje ancho, se han introducido parabrisas de varias capas (multicapa). Es una construcción que proviene del campo militar. Su empleo en aviación civil es consecuencia de la gran resistencia alcanzada en la fabricación de los vidrios templados. De hecho, en el campo militar, tienen resistencia al impacto de bala. La aplicación civil no nece-

sita de la alta resistencia mecánica del campo militar, de manera que es posible construir parabrisas con menor resistencia pero también de menor peso.

Los cristales multicapa de parabrisas están constituidos por varias láminas de material transparente, de vidrio y de plástico. La disposición típica de capas es la siguiente: la capa exterior es una lámina de vidrio de alta resistencia, de unos 5 mm de espesor. La superficie de la cara externa está revestida de una fina película de oro, tan delgada que es transparente, o bien con hilos de 0,03 mm de diámetro, embebidos en la lámina, o cualquier otro material conductor de la electricidad. Proporciona la conductividad eléctrica necesaria que necesitan los sistemas de deshielo y desempeñamiento.

A continuación se interpone una capa de polivinilo, aproximadamente del mismo espesor que la del cristal frontal; luego hay otro laminado (10 mm) de vidrio templado, otra capa intermedia de polivinilo, y finalmente el tercer cristal de vidrio templado, de unos 10 mm de espesor. Este conjunto se aloja en un molde muy preciso de goma de silicona. Finalmente, el molde de goma encaja en el marco de la estructura prevista en el avión.



Sección parcial de parabrisas. Obsérvese la construcción multicapa y el molde de goma sintética en el que están montados los paneles del parabrisas. El buen estado del sello de estanqueidad es fundamental para impedir la entrada de humedad y preservar la integridad de cohesión de las intercapes de material plástico.

Un cuadro típico de aplicación de transparencias en parabrisas podría ser el siguiente:

- 1) *Aviones con cabina presurizada*: vidrio templado con intercapes plásticos;
- 2) *aviones no presurizados y helicópteros* pueden emplear parabrisas de plástico acrílico de alta resistencia, en lugar de vidrio templado, son polímeros termoplásticos de poco peso, tienen buenas cualidades ópticas y admiten además formas geométricas de fabricación complejas;
- 3) *Aviones militares*: policarbonatos (alta resistencia al impacto y poco peso, pero se deben revestir por su escasa resistencia a la abrasión, a la radiación ultravioleta, humedad y a solventes);
- 4) *Aviones ligeros*, plásticos de acetato de celulosa (baja calidad óptica).

Cristales de seguridad

1.3 Los cristales del parabrisas de los aviones pertenecen a la categoría de los llamados cristales de seguridad.

El cristal de seguridad puede ser de dos tipos: templado y laminado.

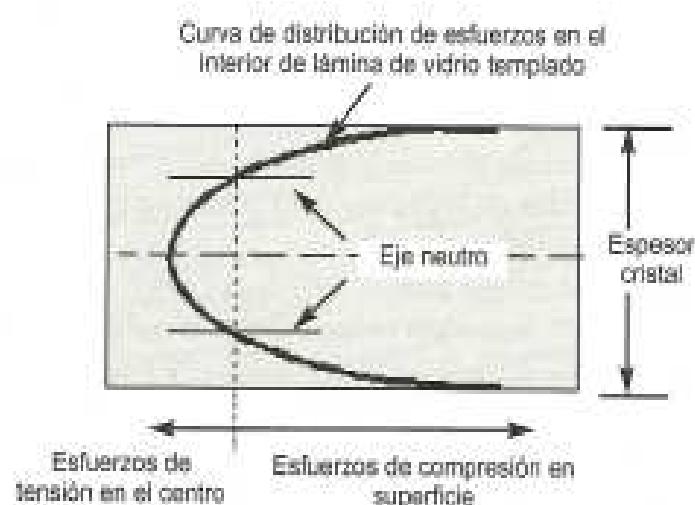
El *cristal templado* es una lámina de vidrio de alta resistencia mecánica. El *cristal laminado*, por su parte, consta de dos o más láminas de vidrio templado pegadas a una o más capas de polivinilo. Las láminas de vidrio templado de este cristal tienen, normalmente, menos resistencia mecánica que el cristal templado puro. El cristal laminado se emplea regularmente en el avión.

El cristal de seguridad se distingue del común fundamentalmente por sus características de rotura. El cristal común rompe en múltiples fragmentos, normalmente grandes y de cantes vivos. Además, la presencia de la primera grieta y la desintegración del cristal son acontecimientos prácticamente simultáneos.

En los cristales de seguridad laminados, por el contrario, existe gran adhesión entre la lámina o láminas de cristal y la capa/s intermedia/s de polivinilo. Debido a este enlace son muy pocos los fragmentos de cristal que se desprenden de la zona detrás del impacto. Esta característica de rotura disminuye el peligro de proyección de trozos de cristal.

1.4 El vidrio templado forma parte de los dos esquemas de cristal de seguridad.

El vidrio templado se obtiene calentando la lámina de cristal hasta su estado amorfo. Una vez alcanzado este punto la superficie exterior de la lámina se enfria rápidamente, adquiriendo gran rigidez. Para ello se aplican chorros de aire dirigidos hacia la superficie. El enfriamiento que produce la corriente de aire endurece



Curva de distribución de esfuerzos a lo ancho de una lámina de vidrio templado. Notese, como explica el texto, que la parte central de la lámina está sometida a esfuerzos de tracción mientras que la más extrema, más allá de los ejes neutros, queda sometida a esfuerzos de compresión.

la superficie exterior del cristal (temple del vidrio) mientras que la interior permanece más caliente durante todo el proceso debido a la menor refrigeración.

El temple del vidrio consigue dos resultados:

a) La superficie externa del cristal, que se enfria rápidamente, se somete a intensas fuerzas de contracción, y permanece en este estado de esfuerzos. Por esta razón el vidrio templado tiene sus caras externas sometidas a un estado de esfuerzos de compresión.

b) El material interior del vidrio, que durante el proceso de temple está más caliente, se somete también a fuerzas de contracción pero menos intensas que en las zonas exteriores, pues el enfriamiento no es tan rápido. La parte central de la lámina de cristal permanece en un estado de esfuerzos de tensión, ligero, consecuencia del rápido enfriamiento y contracción de las superficies adyacentes.

¿Cuál es el resultado práctico de este proceso?

En vista de que los parabrisas de los aviones fallan casi siempre por efectos de fuerzas de tracción (tensión), que son fuerzas opuestas al estado de esfuerzos en que permanece la mayor parte del vidrio templado, resulta que tal estado de esfuerzos debe ser eliminado antes de que el cristal empiece a cargarse realmente a tracción. Digamos, para simplificar, que las tensiones exteriores que se aplican al cristal, primero deben vencer las fuerzas compresivas que posee la lámina de vidrio en su parte más externa, y a partir de este punto se inicia la carga del cristal propiamente a tracción.

La ilustración adjunta muestra de forma gráfica la curva de distribución típica de esfuerzos a lo ancho del panel de vidrio templado para parabrisas de aviones.

Protecciones térmicas, anti-solar y anti-estática

1.5 Conviene resumir aquí las siguientes protecciones del parabrisas:

– *Térmicas*: para antivaho, deshielo y calentamiento del cristal.

Se emplean capas conductoras de electricidad: (a) películas de óxido de estanho, proceso aplicable sólo para vidrios templados pues la deposición debe realizarse a alta temperatura; (b) película de oro, depositada al vacío, y se puede aplicar tanto en plásticos acrílicos como vidrio templado; (c) malla de hilos muy finos conductores, colocados en forma de curvas senoides por todo el cristal.

– *Anti-solar*: con objeto de reflejar hasta el 50% de la energía solar que incide sobre el parabrisas con el fin de limitar la energía radiante que se introduce en la cabina.

– *Anti-estática*: la superficie exterior del parabrisas es un aislante eléctrico en el fuselaje. Para evitar descargas eléctricas por acumulación de carga estática, que pueden dañar las capas del parabrisas, se dispone de un revestimiento conductor que descargue a masa la electricidad acumulada.

– *Anti-radar*: diseño aplicable al campo militar, donde es necesario limitar la sección radar del parabrisas con objeto de que el haz del radar no penetre en la cabina y pueda reflejar los objetos metálicos que se encuentran en ella.

Ventanillas

1.6 Las ventanillas se fabrican normalmente en plásticos acrílicos, formadas por una o más capas de material.

La resistencia al impacto con aves o cuerpos extraños no es un factor determinante en ventanillas, sino más bien el peso de 100 o 200 unidades por avión que se puede aliviar con su fabricación en materiales acrílicos.

Los plásticos de base acrílica se conocen normalmente por sus nombres comerciales: *Plexiglás*, *Lucite*, *Perspex*, etc. Estos materiales garantizan gran resistencia a la fatiga, a la propagación de grietas, al estallido, y gozan además de excelentes propiedades ópticas. De sus cualidades mecánicas basta decir que pesan la tercera parte que el cristal común y tienen una resistencia al choque diez veces mayor. Además, poseen buena resistencia a los agentes atmosféricos (lluvia, nieve, temperaturas altas y bajas). No obstante la buena resistencia de estos materiales a las altas temperaturas, el material pierde resistencia a medida que se calienta. A 80 °C el material pierde rigidez muy rápidamente.



La buena resistencia mecánica de estos materiales está comprometida en la actualidad por su comportamiento frente a productos de azufre presentes en la atmósfera como consecuencia de recientes erupciones volcánicas. Las erupciones (Junio de 1991 en Filipinas, sobre todo) han depositado en la estratosfera gran cantidad de azufre. La pérdida de visibilidad en los cristales de cabina, por el ataque corrosivo de estos productos, favorece la idea de cubrir estas transparencias con una capa fina exterior de vidrio u otro material tal como "SolGard" resistente a estos productos. El revestimiento de ventanillas "SolGard" es insensible al ataque de una solución del 75% de ácido sulfúrico y acetómero.

2. TIPOS DE CONSTRUCCIÓN

2.1 Los parabrisas se distinguen por el material de fabricación y por el tipo de construcción

Según el *material de fabricación*, como hemos dicho, los parabrisas pueden ser de acetato de celulosa (en algunos aviones ligeros), de plásticos acrílicos, y de vidrio templado, monocapa o multicapa.

Según el *tipo de construcción* los parabrisas se clasifican por la categoría de avión donde se instalan, en dos grandes grupos:

a) parabrisas simples, instalados en aviones convencionales, no presurizados.

b) parabrisas especiales, para cabinas presurizadas, que tienen calefacción eléctrica y otras protecciones, destinados a los aviones con capacidad de vuelo en cualquier condición meteorológica (ver el Cap. 39 donde se estudia con más detalle la calefacción del parabrisas).

2.2 Los cristales de parabrisas y ventanillas cuentan con un borde de refuerzo mediante el cual se fijan a la estructura del avión. Los bordes de refuerzo se fabrican en diversos materiales elastómeros.

Hay dos métodos de montaje del parabrisas en el fuselaje, con pernos o mordazas de fijación. Los plásticos acrílicos se pueden taladrar y aceptan en principio la unión con pernos, pero el vidrio templado no que de una forma u otra debe montarse con mordazas. Esta fijación tiene sus ventajas pues se eliminan concentraciones de esfuerzos en los taladros. En ambos casos, el borde de montaje cumple un importante papel estructural. Su función es distribuir las cargas de presurización de forma uniforme sobre todo el cristal.

3. Limitaciones estructurales

3.1 El parabrisas de los aviones comerciales deben cumplir los requisitos que citamos a continuación:

1. Todos los parabrisas están fabricados con cristales de seguridad.
2. El parabrisas debe tener resistencia al impacto de un ave con un peso de 4 libras (1,81 kg), a la velocidad de cálculo de crucero V_C del avión al nivel del mar, o a $0,85 V_C$ a 8000 pies, lo que sea más crítico.
3. Además de los requisitos anteriores, el fabricante del avión debe demostrar que la probabilidad de desprendimiento de fragmentos de cristales, por impacto de aves en el parabrisas, es muy pequeña. En caso contrario debe disponer los medios necesarios para que los fragmentos desprendidos no alcancen a los pilotos, requisito que impone muchas veces la geometría final del parabrisas. Estos requisitos se imponen para el cristal frontal y los incluidos dentro de $\pm 15^\circ$ del eje longitudinal del avión.
4. Los paneles del parabrisas deben estar dispuestos de forma que la rotura o pérdida de visión a través de uno de ellos no impida a uno de los pilotos mantener la visión a través del resto de los paneles (ver apartado 4).

Microgrietas del cristal acrílico ("Crazing")

3.2 La flexión del panel acrílico es responsable principal de la presencia de minúsculas fisuras, del orden de 0,02 mm, denominadas "crazing" en el lenguaje técnico.

Las microgrietas son aproximadamente perpendiculares a la superficie del laminado. Los bordes de las fisuras acumulan gran tensión residual, que permite su propagación a zonas adyacentes del cristal bajo la acción de las cargas normales en vuelo.

El "crazing" disminuye la resistencia al impacto del cristal y degrada sus características mecánicas; sobre todo disminuye sus cualidades ópticas, haciendo preciso en su caso el pulido de las superficies. El "crazing" es un fenómeno producido por las cargas de flexión que se imponen al cristal, pero también es consecuencia del ataque de productos de limpieza no aprobados para servicio del avión, a la contaminación atmosférica, materiales transparentes de baja calidad, o inadecuado montaje del conjunto.

4. ÁREAS DE VISIÓN EN EL PARABRISAS. POSICIÓN VISUAL DE DISEÑO

4.1 La información que sigue contiene material para referencia, pero explica detalles importantes del entorno del "cockpit".

La forma geométrica del parabrisas depende de los requisitos de tres funciones técnicas.

- a) Visibilidad de los pilotos
- b) Requisitos especiales de normativa
- c) Consideraciones de resistencia mecánica del parabrisas.

a) Requisitos de visibilidad para los pilotos

La visión exterior de cada piloto a través del parabrisas se determina por medio de la posición visual de diseño (PVD), ver punto C, parte A de la Fig. 2.1.

PVD es un punto de referencia importante del entorno del "cockpit" pues determina, entre otros, la posición de los asientos, su elevación normal en relación al piso de cabina, situación de los mandos de vuelo, etc. A partir de este punto se obtienen los espacios de la cabina que son accesibles para los pilotos y las distancias aproximadas de los movimientos de brazos y piernas.

El punto C está situado a 84 mm del eje de rotación de la cabeza del piloto. Se considera que es el centro de visión con capacidad de movimiento en un radio de 84 mm en acimut. Esta distancia radial se corresponde con la media de las dimensiones del cráneo del ser humano. Trazando por el punto C un plano vertical, paralelo al eje longitudinal del avión, se obtienen las líneas de intersección con los límites del parabrisas y el contorno del fuselaje. La distancia LC entre la posición visual de diseño y su proyección horizontal en el parabrisas oscila entre 500 y 600 mm.

NOTA

El gran juego de ajuste de los asientos de los pilotos, aparte de las diferencias normales en tallas, se debe a que en las bibliotecas de datos antropométricos no ha sido posible obtener relaciones sistemáticas entre la longitud de brazos y piernas, y la distancia entre la posición visual de diseño C y el plano de

contacto de los glúteos con el asiento. Sencillamente, lo que sucede es que no existen en el ser humano relaciones proporcionales específicas entre las tres variables. La única solución, entonces, es permitir un amplio juego de desplazamiento en el asiento para suplir esta falta de proporcionalidad. Aplíquese esto, con sus características propias, al campo del automóvil.

b) Requisitos de normativa

Una vez determinado PVD, podemos definir la visibilidad a través del parabrisas como el sector angular resultante de la intersección de vectores radiales que emanan desde la PVD con las transparencias del parabrisas.

Las áreas de visión deben cumplir dos tipos de requisitos:

1) Condiciones generales en radio normal

Se establecen los ángulos de visión óptimos a partir de planos horizontales y verticales, que pasan por cada punto visual de diseño, para comandante y piloto. La Fig. 2.2, parte inferior, muestra la geometría óptima de visibilidad recomendada por CAM-4B (Civil

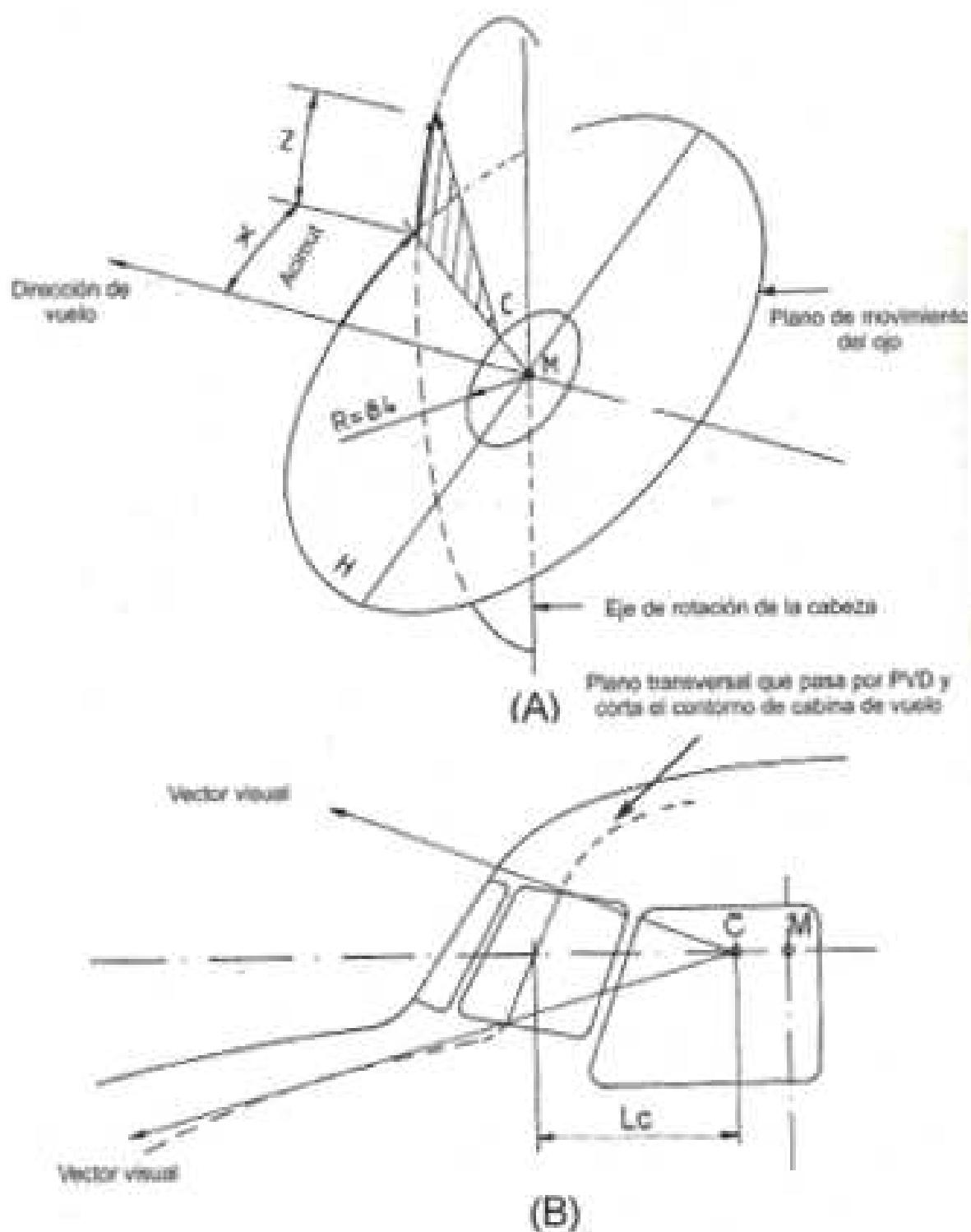


Fig. 2.1 Definición del Punto visual de diseño del piloto a través del parabrisas.
(Cortesía de Dassault Corporation).

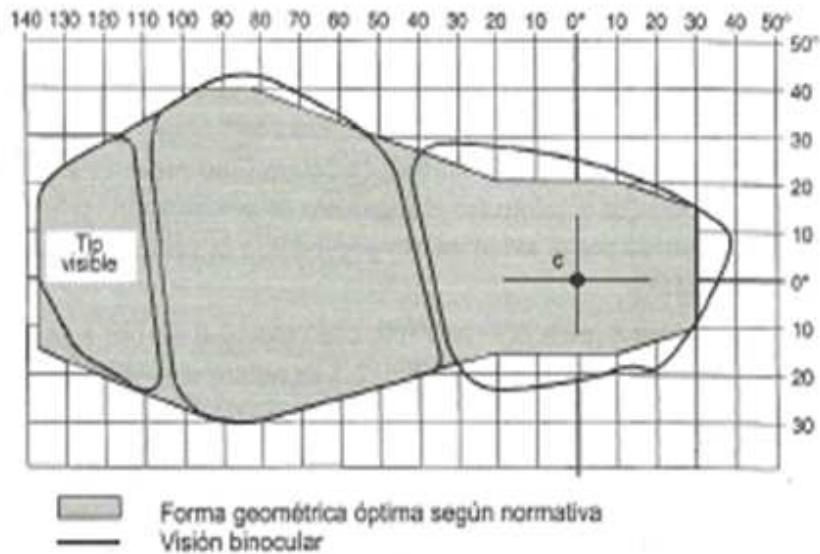


Fig. 2.2 Visión binocular a través del parabrisas del avión Airbus A-340 (posición de comandante) comparada con la óptima de la norma CAM-4B, la regulación más exigente en este campo. C es la proyección horizontal sobre el parabrisas del punto visual de diseño. Arriba, A340 de la compañía China Southwest Airlines donde se aprecia la forma geométrica del parabrisas. (Cortesía de Airbus Industrie.)

Aeronautics Handbook) superpuesta sobre el contorno del parabrisas de un avión actual (Airbus A-340). El manual CAM-4B es la pauta más exigente entre las normas que tratan este tema, de manera que muchos fabricantes tienen a gala comparar esta geometría teórica con la del parabrisas de su avión, como es el caso de la Fig. 2.2.

Obsérvese en la figura la proyección horizontal del punto visual de diseño –el origen de coordenadas– a derecha e izquierda del cual se establecerán las áreas de visibilidad frontal y lateral. El parabrisas óptimo de la norma no contiene los marcos de fijación de cada pa-

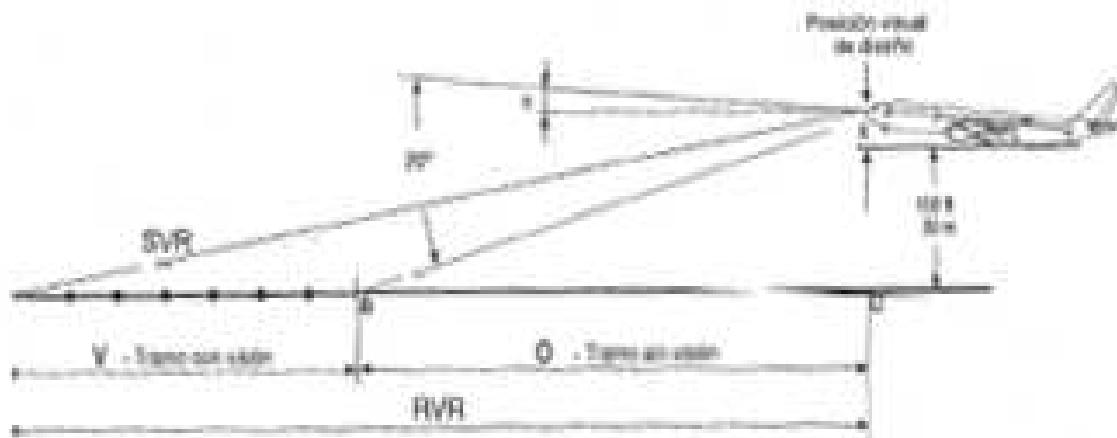


Fig. 2.3 Condiciones de visibilidad a través del parabrisas en fase de aterrizaje para el avión Airbus 320. Alcance Visual de Pista RVR = 240 m, θ entre 2,1° y 3,7°, $X = 9$ m. Nota: adviértase que el gráfico no está dibujado a escala.

nel, que quedan a criterio del fabricante, aunque no debe existir obstrucción para la visión del piloto en la banda de 20° izquierda a 20° derecha. En general, las formas geométricas de las normas son áreas de visión óptimas, obtenidas por ordenador, y que persiguen el objetivo fundamental de "ver y ser visto".

2) Condiciones en el aterrizaje

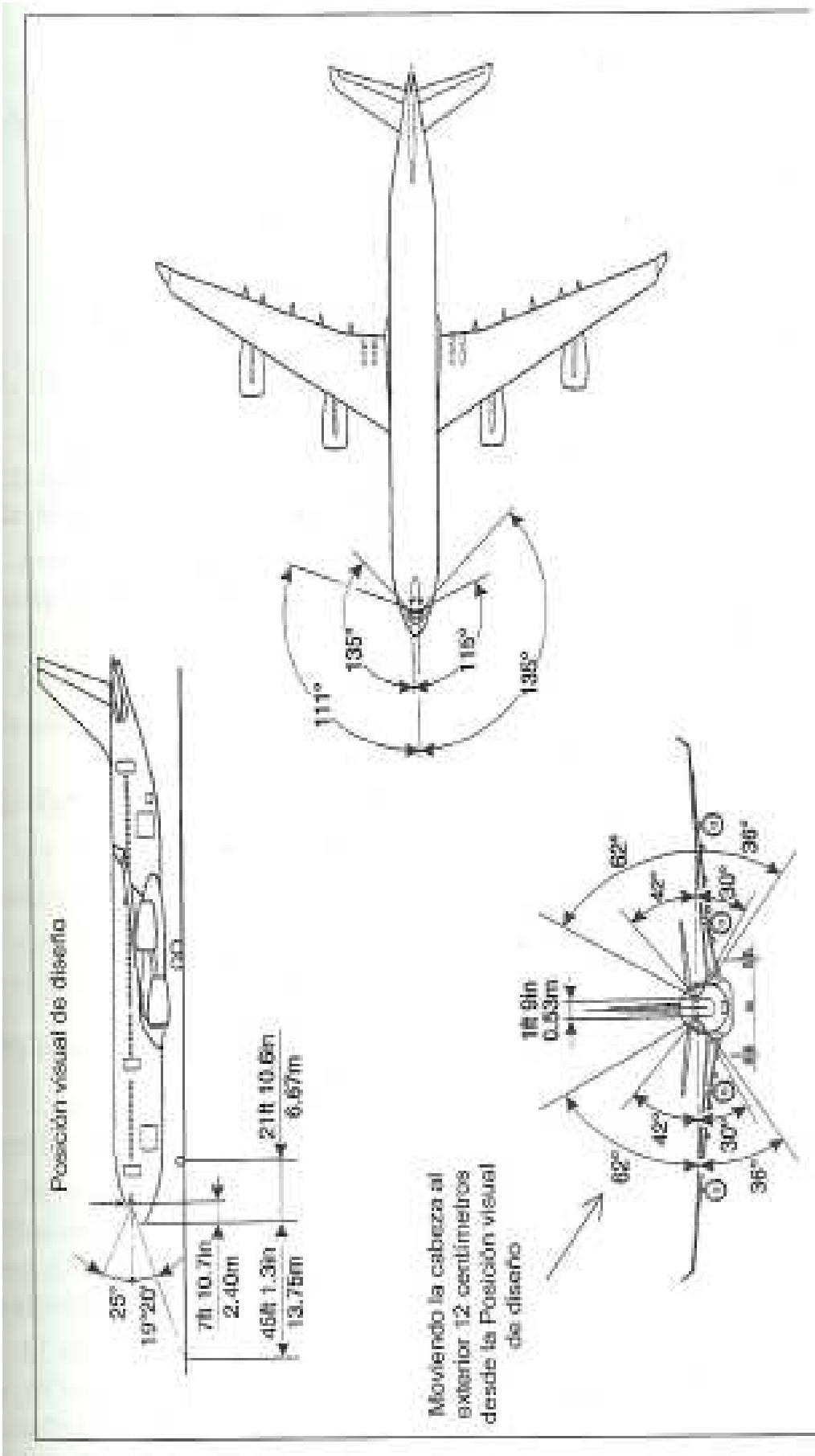
Se establecen las áreas de visión mínimas en función de la condición más crítica de carga y centro de gravedad del avión, para una pendiente de 2,5° en la senda de planeo, con guillada para compensar un viento cruzado de 10 nudos, y una altura de decisión de 100 pies, contados a partir del punto más bajo del avión. Las condiciones se establecen para alcance visual en la pista (Runway Visual Range) de 240 m (780 pies). El ángulo de visión al frente y abajo debe permitir al piloto ver el segmento de aproximación o luces de la zona de contacto que es recorrido por el avión en tres segundos, a la velocidad de aproximación en las condiciones citadas.

Así, por ejemplo, para el Boeing 767-200/300, con velocidad de 140 KIAS, el segmento de visión mínimo requerido es 216 m. La Fig. 2.3 se refiere al A-320.

c) Consideraciones de resistencia mecánica: impacto con pájaros

Señalamos dos ideas, que ilustran la complicación que introduce en la forma del parabrisas los requisitos estructurales de resistencia al impacto de pájaros. 1. Los parabrisas de grandes dimensiones precisan de marcos muy rígidos (por tanto, mayor peso); 2. Los parabrisas con cristales planos son excelentes desde el punto de vista óptico y de resistencia al impacto con pájaros, pero tienen mayor resistencia aerodinámica. Los curvados son mejores desde el punto de vista aerodinámico pero empeoran la cualidades ópticas.

Se trata, pues, de una opción de compromiso en la que se considera también la forma geométrica y dimensiones del cristal.



Campo de visibilidad del piloto en el avión Airbus A340. Definidos a partir de la Posición visual de diseño

