CIAIAC
Comisión de Investigación
de Accidentes e Incidentes
de Aviación Civil

INFORME TÉCNICO
A-068/1999

Accidente ocurrido
el día 7 de noviembre
de 1999 a la aeronave
FOKKER F28 MK-100,
matrícula I-ALPL,
en el Aeropuerto de
Barcelona (Barcelona)

MINISTERIO
DE FOMENTO

Informe técnico

A-068/1999

Accidente ocurrido el día 7 de noviembre de 1999 a la aeronave FOKKER F28 MK-100, matrícula I-ALPL, en el Aeropuerto de Barcelona (Barcelona)

MINISTERIO DE FOMENTO

SECRETARÍA GENERAL DE TRANSPORTES

COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES E INCIDENTES DE AVIACIÓN CIVIL

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento ©

NIPO: 161-03-011-0
Depósito legal: M. 23.129-2003
Imprime: Centro de Publicaciones

Diseño cubierta: Carmen G. Ayala

COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES E INCIDENTES DE AVIACIÓN CIVIL

Tel.: +34 91 597 89 60 E-mail: ciaiac@mfom.es C/ Fruela, 6
Fax: +34 91 463 55 35 http://www.mfom.es/ciaiac 28011 Madrid (España)

Advertencia

El presente Informe es un documento técnico que refleja el punto de vista de la Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil en relación con las circunstancias en que se produjo el evento objeto de la investigación, con sus causas y con sus consecuencias.

De conformidad con lo señalado en la Ley 21/2003, de Seguridad Aérea, y en el Anexo 13 al Convenio de Aviación Civil Internacional, la investigación tiene carácter exclusivamente técnico, sin que se haya dirigido a la determinación ni establecimiento de culpa o responsabilidad alguna. La conducción de la investigación ha sido efectuada sin recurrir necesariamente a procedimientos de prueba y sin otro objeto fundamental que la prevención de los futuros accidentes.

Consecuentemente, el uso que se haga de este Informe para cualquier propósito distinto al de la prevención de futuros accidentes puede derivar en conclusiones e interpretaciones erróneas.

Índice

Abreviaturas vii

Sinopsis ix

1. Información sobre los hechos 1

1.1. Reseña del vuelo 1
1.1.1. Vuelo 1
1.1.2. Aproximación 1
1.1.3. Toma de tierra 1
1.1.4. Evacuación 2
1.1.5. Notificación del accidente 3
1.2. Lesiones a personas 3
1.3. Daños sufridos por la aeronave 4
1.4. Otros daños 4
1.5. Información sobre la tripulación 4
1.5.1. Comandante 4
1.5.2. Copiloto 5
1.5.3. Tripulación auxiliar 5
1.6. Información sobre la aeronave 5
1.6.1. Historia de los modelos Fokker F28 y configuración 5
1.6.2. Actuaciones de aterrizaje del Fokker MK-100 6
1.6.3. Identificación célula avión accidentado 7
1.6.4. Certificado de aeronavegabilidad 7
1.6.5. Registro de mantenimiento 7
1.6.6. Motores 8
1.6.7. El fenómeno de zigzagueo 9
1.6.8. Historia de los fenómenos de zigzagueo en relación con el tren principal del Fokker MK-100 10
1.6.9. Historial de mantenimiento del amortiguador de zigzagueo 10
1.7. Información meteorológica 11
1.8. Ayudas a la navegación 11
1.9. Comunicaciones 12
1.10. Información sobre el aeródromo 12
1.11. Registradores de vuelo 12
1.11.1. Registrador de datos de vuelo 12
1.11.2. Registrador de voces en cabina (CVR) 14
1.12. Información sobre los restos de la aeronave y el impacto 14
1.12.1. Huellas en la pista del avión y los neumáticos y restos menores recogidos en la pista del aeropuerto 14
1.12.2. Examen del avión tras el accidente 16
1.12.3. Examen del tren derecho tras el accidente 17
1.13. Información médica y patológica 19
1.14. Incendio 19
1.15. Supervivencia 20

1.16. Ensayos e investigaciones 21
1.16.1. Holguras en la articulación/soporte principal del tren derecho 21
1.16.2. Análisis de la fractura del cilindro superior 21
1.16.3. Análisis de la fractura del herraje de ala 23
1.16.4. Análisis del material del cilindro superior en el INTA 23
1.16.5. Amortiguador de zigzagueo: desmontaje y pruebas funcionales 24
1.17. Información orgánica y de dirección 26
1.17.1. Visita a la pista del Aeropuerto de Barcelona 26
1.17.2. Normativas referentes al proyecto de aeródromos OACI 26

2. Análisis 27
2.1. Vuelo, aproximación y toma de tierra 27
2.2. Frenada y control del avión en la carrera de aterrizaje 27
2.3. Evacuación del avión y salvamento 28
2.4. Estado de mantenimiento 29
2.4.1. Mantenimiento programado 29
2.4.2. Mantenimiento en línea 29
2.4.3. Holguras y desgastes en articulaciones principales 29
2.4.4. Mantenimiento del amortiguador de vibraciones en taller 30
2.5. Vibración de zigzagueo 31
2.6. Secuencia de las roturas 32
2.7. Análisis de las causas 33
2.7.1. Origen de la vibración 33
2.7.2. Fallo funcional del amortiguador de zigzagueo 33
2.7.3. Técnicas de vuelo 34

3. Conclusión 35
3.1. Conclusiones 35
3.2. Causas 36

4. Recomendaciones sobre seguridad 37

Apéndices 39
Apéndice A. Parámetros de DFDR 41
Apéndice B. Croquis del Aeropuerto de Barcelona 45
Apéndice C. Dibujo del tren y croquis de las líneas de grietas y fracturas en el cilindro superior 49
Apéndice D. Capacidad de amortiguación de zigzagueo en distintas condiciones 55

Abreviaturas

°	Grado
°C	Grado centígrado
1L	Puerta delantera izquierda
1R	Puerta delantera derecha
AFM	Manual de vuelo del avión
APP	Control de aproximación
ATPL	Licencia de piloto de línea aérea
CAS	Velocidad calibrada respecto al aire
CBO	Potencial de ciclos entre revisiones (ciclos entre aterrizajes)
CECOPS	Oficina de control del aeropuerto
CIAIAC	Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil
CMM	Manual de mantenimiento del componente («Component Maintenance Manual»)
CPL	Licencia de piloto comercial
CSN	Ciclos desde nuevo
CSO	Ciclos (aterrizajes) desde la última revisión general
DFDR	Registrador de datos de vuelo digital
ENAC	«Ente Nazionale per l'Aviazione Civile»
EPR	Relación de presiones del motor (índice de potencia)
F/A1	Auxiliar de vuelo n.° 1
F/A2	Auxiliar de vuelo n.° 2
F/A3	Auxiliar de vuelo n.° 3
FC	Ciclos de vuelo
g	Aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2)
GND	Parte del control de torre TWR que controla el movimiento de los aviones entre las posiciones de estacionamiento y las calles de rodadura hasta 200 m del punto de espera para el despegue
GS	Velocidad respecto a tierra
h	Hora
IAS	Velocidad indicada
ILS CAT II/III	Sistema de aterrizaje por instrumentos de categoría dos y tres
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
IR	Habilitación como instructor de vuelo
kg	Kilogramo
kt	Nudo
l	Litro
LDA	Longitud disponible para el aterrizaje
LH-MLG	Pata de tren principal izquierdo
lpm	Litros por minuto
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
NLR	Laboratorio Nacional Aeroespacial de los Países Bajos («National Aerospace Laboratory, The Netherlands»)
P/N	Número de parte
PA	Sistema de aviso al pasaje
RAI	Registro Aeronáutico Italiano
RH-MLG	Pata de tren principal derecho
RLD	Autoridad de Aviación Civil de los Países Bajos
S/N	Número de serie
s	Segundo (tiempo)
SB	Boletín de servicio
SB F100	Boletín de servicio del avión F101
TBO	Potencial de tiempo entre revisiones (tiempo en horas de vuelo)
TWR	Control de torre
UTC	Tiempo Universal Coordinado

Sinopsis

La aeronave Fokker F28 MK-100, matrícula I-ALPL, operada por Alpi Eagles, realizaba el vuelo DLA 2708 de Air Dolomiti y aterrizaba en Barcelona el día 7 de noviembre de 1999 a las 13:55 UTC.

Estaba haciendo un vuelo comercial de Venecia a Barcelona con 5 tripulantes y 39 pasajeros a bordo.

Instantes después del primer contacto de las ruedas en la toma de tierra por la pista 25, el tren de aterrizaje derecho experimentó un fenómeno de vibración de zigzagueo, de amplitud divergente, que en pocos segundos causó la rotura del cilindro superior del tren de aterrizaje principal derecho (RH-MLG).

La vibración no se amortiguó por causa de la baja capacidad de amortiguación del amortiguador de zigzagueo, debido a un defecto del componente.

Tras la rotura de pata, el avión se venció al lado derecho arrastrando por la pista la punta del plano y flap derechos. Se desplazó unos 1.000 metros sobre la superficie pavimentada, arrollando varias luces de borde de pista, hasta detenerse en una isleta de hierba entre dos calles de rodaje a 100 metros a la derecha del eje de pista.

No se produjo incendio. La tripulación y el pasaje evacuaron ordenadamente la aeronave por la rampa de la puerta delantera derecha de servicio/emergencia. No hubo lesionados.

La aeronave sufrió daños de consideración en el ala y en los capós de motor derecho, además de los de la pata derecha del tren de aterrizaje.

1. INFORMACIÓN SOBRE LOS HECHOS

1.1. Reseña del vuelo

1.1.1. *Vuelo*

El día 7 de noviembre de 1999, a las 13:55 hora UTC[1], el avión Fokker F28 MK-100, matrícula I-ALPL, se disponía a tomar tierra en el Aeropuerto de Barcelona. La aeronave estaba siendo operada por Alpi Eagles, a favor de Air Dolomiti, bajo un acuerdo comercial. El vuelo, DLA-2708 de Air Dolomiti, había despegado en Venecia a las 11:31 h con un peso de 37.427 kg. Era un vuelo comercial, de unas dos horas de duración, con 39 pasajeros a bordo, dos tripulantes técnicos y tres tripulantes auxiliares. El consumo aproximado de combustible en ese trayecto era de unos 3.000 kg, por lo que el peso de aterrizaje alcanzaba unos 34.500 kg, de los cuales 3.000 kg se debían al combustible de reserva en los depósitos principales integrados en las alas.

Ese mismo día, a las 08:26 h, el avión ya había tomado tierra en Barcelona en un vuelo anterior, con una tripulación distinta, procedente de Verona.

En Barcelona la pista en servicio para arribadas era la 25, mientras que para los despegues se utilizaba la pista 20.

1.1.2. *Aproximación*

El vuelo DLA-2708 había transcurrido normalmente, el viento estaba en calma, no había techo de nubes, la visibilidad era superior a los 10 kilómetros y control de torre (TWR) ya le había dado la autorización para aterrizar. Actuaba como piloto a los mandos el copiloto, que mantenía una velocidad de unos 140-145 kt, unos 9-14 nudos por encima de la velocidad de referencia correspondiente al peso de aterrizaje de 35.000 kg y elevación del aeropuerto al nivel del mar. La configuración, después de haber realizado las comprobaciones de la lista de chequeo, era la de aterrizaje con 25° de flap. El vuelo en la aproximación a la pista 25 se hacía en manual, es decir, sin conectar el piloto automático. En el circuito de aproximación a esa pista 25 de Barcelona había otras aeronaves.

El tráfico siguiente en el orden de aterrizaje era un vuelo de Iberia, IBE-4571, que le seguía a cuatro millas, pero que no tenía a la vista aún al Fokker. El vuelo DLA-2708, que iba siendo alcanzado, comunicó que trataría de salir de la pista inmediatamente.

1.1.3. *Toma de tierra*

La declaración del comandante indicó que pusieron las ruedas en un punto situado a unos 300 m desde el umbral de la pista 25. Por el DFDR (registrador digital de datos de

[1] Todas las referencias horarias se expresan en UTC. La hora local, que es común en Venecia y Barcelona, se puede obtener sumando una hora a la hora UTC.

vuelo) se conoce que el máximo ángulo de asiento en la recogida, que fue de 4,9°, se alcanzó seis segundos antes de que grabara la señal de modo de tierra[2]. La señal de tierra grabada coincide en el tiempo con un registro de velocidad de 128 kt respecto del terreno (GS). Tres segundos más tarde el ángulo de asiento disminuía, permitiendo el contacto de la rueda de morro con el pavimento con velocidad de 110 kt (GS).

En torno a esos instantes, estando ya el avión rodando, experimentó una vibración que iba en aumento sentida tanto por los pilotos como por la tripulación auxiliar y pasajeros. La puerta de cabina de vuelo, abierta durante el aterrizaje, según los requisitos de AFM, se cerró por sí sola a causa de las vibraciones; fue vuelta a abrir por la auxiliar F/A1. La auxiliar que se sentaba en el transportín trasero, F/A3, declaró que en el aterrizaje se oyó un golpe fuerte repentino.

El comandante tomó el control de la aeronave cuando se sintieron las vibraciones. Los frenos aerodinámicos de tierra se desplegaron con normalidad. La aeronave daba bandazos con tendencia a irse a la derecha y el piloto utilizó los frenos y aplicó reversa en ralentí tratando de frenar y de mantener el avión en la pista. Después incrementó la potencia asimétricamente, hasta 1,18 EPR en el motor izquierdo y 1,13 en el derecho.

Unos tres segundos después de bajar el morro colapsó el tren principal derecho. Las dos ruedas junto con el cilindro inferior de la pata de tren derecho, salieron despedidas hasta chocar con el carenado del motor derecho. El ala se venció a ese lado y arrastró rozando el flap derecho y punta de ala y alerón. En el ala se rompió el herraje principal del tren. Los depósitos de combustibles, sin embargo, conservaron su estanqueidad.

La aeronave se detuvo finalmente en la franja de la pista, fuera de la zona asfaltada, en una isleta de hierba, a 1.730 m de la cabecera de pista y a 100 m a la derecha de la línea central o eje de pista, en la salida rápida G-A. El ala derecha descansaba en el suelo. Desde la actuación del sensor de modo tierra hasta que el avión se detuvo transcurrieron 36 s.

1.1.4. *Evacuación*

No se produjo incendio. Los motores fueron apagados siguiendo la lista de chequeo normal.

Tras la orden de evacuación del comandante, la auxiliar F/A1 abrió la puerta de servicio/emergencia 1R, comprobó el despliegue de la rampa y ayudó en la evacuación de los pasajeros. Después abrió la puerta de pasajeros 1L, que se accionó con normalidad, aunque ningún pasajero la utilizó.

La evacuación se hizo ordenadamente y sin problemas. Los sistemas de avisos al pasaje (PA) y de intercomunicación funcionaron regularmente.

[2] Las patas de tren disponen de microinterruptores que se accionan con la deflexión del amortiguador principal, de tal manera que se pueda determinar si el peso del avión está sustentado por las alas, modo aire, o bien gravita sobre el suelo, modo tierra. Dicha señal es utilizada por diversos automatismos.

Foto 1.1.1

No hubo lesionados. Los servicios médicos acudieron al lugar del desembarco. Los pasajeros fueron trasladados al edificio terminal en las jardineras.

Cuatro vehículos de incendios acudieron al lugar en pocos segundos, asegurando la aeronave con la aplicación de espuma sobre el lado derecho, pues perdía combustible por la zona del motor.

1.1.5. *Notificación del accidente*

La primera señal de alerta, segundos después del accidente, la lanzó una estación sin identificar. Control GND alertó 10 s después al Servicio de Salvamento y Extinción de Incendios de la existencia de una aeronave con problemas en su aterrizaje. La aeronave quedó a la vista del personal del Servicio de Salvamento y Extinción de Incendios. La alerta del propio avión accidentado se emitió diez segundos más tarde. Esta información se ha extraído de la grabación de TWR.

1.2. Lesiones a personas

Lesiones	Muertos	Graves	Leves/Ilesos
Tripulación			5
Pasajeros			39
Otros			

1.3. Daños sufridos por la aeronave

El accidente produjo daños de importancia a la aeronave.

1.4. Otros daños

El arrastre del ala sobre la pista produjo daños diversos de abrasión de la superficie asfáltica que dejaron cinco agujeros de distintas dimensiones y rotura de una veintena de luces de balizaje, en el borde de pista y de las salidas G-A y C1-3.

Los aviones en tránsito fueron desviados a zonas y puntos de espera. Transcurridos algunos minutos empezaron a operar en la pista 02/20.

La pista 07/25 estuvo fuera de servicio durante 5 horas, durante las cuales se realizaron labores de limpieza y de reparación de la superficie asfáltica de la pista, aunque las reparaciones de las balizas no se concluyeron hasta las 8:50 horas de día siguiente. Una hora antes, a las 7:50 h, se finalizó el traslado del avión a la zona de hangares.

Se recogió el combustible que fugaba del motor derecho durante cuatro horas.

1.5. Información sobre la tripulación

1.5.1. *Comandante*

Sexo:	Varón
Nacionalidad:	Italiana
Título:	ATPL
Licencia de aptitud de vuelo:	V3665170
Fecha de emisión:	08-07-1996
Fecha de caducidad:	28-04-2000
Habilitaciones de tipo:	F100, IR
Fecha del último reconocimiento médico:	31-08-1999
Experiencia vuelo últimos 90 días:	236 h
Experiencia vuelo últimos 30 días:	80:50 h
Experiencia vuelo últimas 24 horas:	3:30 h
Duración último descanso:	20:05 h
Tiempo en servicio antes del accidente:	2:05 h

1.5.2. *Copiloto*

Sexo:	Varón
Nacionalidad:	Italiana
Título:	CPL
Licencia de aptitud de vuelo:	8219
Fecha de emisión:	06-10-1992
Fecha de caducidad:	31-12-1999
Habilitaciones de tipo:	F100, IR
Fecha del último reconocimiento médico:	18-02-1999
Experiencia vuelo últimos 90 días:	175 h
Experiencia vuelo últimos 30 días:	64:15 h
Experiencia vuelo últimas 24 horas:	5:10 h
Duración último descanso:	16:10 h
Tiempo en servicio antes del accidente:	2:05 h

1.5.3. *Tripulación auxiliar*

La tripulación auxiliar estaba compuesta por tres tripulantes con licencias nacionales en vigor. Su experiencia de vuelo era de unas 200 horas en los últimos 90 días. Antes de comenzar el vuelo, ese día habían disfrutado de un descanso superior a 24 horas.

1.6. Información sobre la aeronave

1.6.1. *Historia de los modelos Fokker F28 y configuración*

El avión

Los aviones Fokker F28 son reactores de unos 65-85 pasajeros, según la configuración, y de corto alcance. Están dotados de motores de reacción Rolls Royce. El Fokker F28, con motores Spey, entró en servicio en 1969.

Como desarrollo y actualización del F28 en 1986 apareció el MK-100 con motores Tai. El modelo MK-70 es una versión del MK-100 con fuselaje corto. Hasta el año 1996, en el que la compañía Fokker interrumpió su actividad, se habían fabricado 274 aviones MK-100 y 27 aviones MK-70.

La configuración del avión es de ala «cantilever», estructura semimonocasco, motores en la cola y tren triciclo.

El tren de aterrizaje (véase Figura C.1 en el Apéndice C)

La pata de morro tiene dos ruedas montadas en el mismo eje con neumáticos de tamaño 24 × 7,7 (medidas en pulgadas del diámetro exterior y la anchura), con «ply rating» 12 y «speed rating» 225. Las ruedas están dotadas de un pequeño freno para detener su giro tras el despegue dentro de su compartimiento de retracción.

El avión montaba trenes de aterrizaje fabricados por Messier-Dowty Rotol.

Las dos patas, izquierda y derecha, son iguales. Cada pata del tren principal está constituida por un cilindro superior, unido al herraje principal de ala por fijaciones articuladas y un cilindro inferior unido a las ruedas. El cilindro inferior puede desplazarse axialmente dentro del cilindro superior. El interior de los cilindros está cargado de líquido hidráulico y nitrógeno a presión, proporcionando las funciones de suspensión y amortiguación. El desplazamiento axial comprime el nitrógeno y fuerza a pasar el líquido hidráulico entre las cámaras que un pistón interior separa de la cámara de nitrógeno.

El cilindro superior se une a los largueros de ala mediante un herraje principal con articulación longitudinal, que permite la retracción del MLG plegándose lateralmente hacia el fuselaje por medio de un martinete. En posición de tren extendido, una riostra articulada y unos blocajes afianzan su posición de tren abajo. Estos elementos se instalan a la derecha o a la izquierda del cilindro superior según se instale la pata en posición izquierda o derecha del avión.

Las dos ruedas gemelas de cada pata, dotadas de neumáticos de tamaño H40 × 14,0-19 («ply rating» 20 y «speed rating» 225), se montan sobre un eje horizontal unido al cilindro inferior. La posición radial entre ambos cilindros se mantiene mediante unas tijeras o compases articulados entre sí en un vértice común y entre cada brazo y cada cilindro. Las tijeras permiten el desplazamiento axial de los cilindros e impiden la rotación entre ellos.

En el vértice común de las tijeras se monta un amortiguador de vibración de zigzagueo (llamado en inglés «shimmy damper»).

1.6.2. *Actuaciones de aterrizaje del Fokker MK-100*

— Con un peso de 35.000 kg, flap de 25°, a nivel del mar y con viento en calma, la aeronave necesita una longitud de pista de aterrizaje de 1.383 m, incluyendo en ella un margen del 40% para posibles desviaciones respecto de la distancia demostrada en pruebas. Los aterrizajes normales con ese peso tienen un recorrido de entre 830 y 1.383 m.
— La velocidad de referencia en la aproximación para ese peso es de 131 kt IAS.
— La lista de chequeo previa al aterrizaje incluye el armado de los frenos aerodinámicos de tierra y la selección de la posición de flap.
— En las pruebas de demostración para certificación de las actuaciones de aterrizaje no se usa el empuje inverso de los motores y se sobrevuela el umbral de pista a 50 ft.

1.6.3. *Identificación célula avión accidentado*

Marca:	Fokker
Modelo:	F-28 MK-0100
Número de fabricación:	11250
Matrícula:	I-ALPL
Versión:	89 pasajeros/2 tripulantes técnicos/4 tripulantes auxiliares
MTOW:	44.450 kg
Propietario:	San Paolo Leasing S.p.A.
Operador:	Alpi Eagles
Explotador:	Air Dolomiti

La versión de cabina está definida por el operador como 000/012/077, indicando una acomodación de 12 pasajeros en primera clase («Business»), en las filas 1, 2 y 3, y 77 pasajeros en clase turista («Economy»).

1.6.4. *Certificado de aeronavegabilidad*

Número:	13594A expedido por el Registro Aeronáutico Italiano (RAI)
Tipo:	TPP/I, TPM. Transporte de pasajeros y mercancías
Fecha de expedición:	20-06-1996
Fecha de caducidad:	15-06-2002

1.6.5. *Registro de mantenimiento*

El plan de mantenimiento de Alpi Eagles estaba aprobado por RAI con fecha de 28-07-1998.

Situación respecto del programa de mantenimiento

Horas totales de vuelo:	24.429
Ciclos totales de vuelo:	22.880
Última revisión «D»:	01-04-1999
TSO. Horas desde la última revisión «D»:	1.428
Ciclos de la pata del tren principal izquierdo:	18.083

Ciclos de la pata del tren principal derecho:	18.306
Potencial de ciclos entre revisiones pata tren:	20.000
Ciclos del amortiguador de zigzagueo RH:	2.795
CBO. Potencial de ciclos entre revisiones del amortiguador de zigzagueo:	12,000

— Después del último vuelo del día anterior al accidente, personal de mantenimiento en Verona realizó al avión la inspección diaria de servicio. En esa inspección se comprueba el nivel de líquido hidráulico en el depósito de reserva del amortiguador de zigzagueo. El depósito tiene un indicador, línea roja, que aparece cuando desciende el nivel de líquido en él.
— No existía ninguna anormalidad de parte de vuelo reflejada en la lista de defectos diferidos.
— Dos días antes de la fecha del accidente se le cambió la rueda n.° 3 y el conjunto de frenos n.° 3, por una alerta del taller de componentes al observar el estado de una rueda anteriormente desmontada de esa posición. La rueda desmontada por la orden de trabajo mostraba efectivamente daños en el alojamiento del rodamiento interior producidos por el conjunto de frenos.
— El día 8-9-1999, dos meses antes del día del accidente, se había cambiado el conjunto de frenos n.° 3. Tras el aterrizaje, el conjunto de frenos n.° 3 quedó blocado impidiendo la rodadura. La temperatura de frenos alcanzó 500 °C.
— El día 1-9-1999 se recargó líquido hidráulico en el amortiguador de zigzagueo de la pata derecha.
— El amortiguador de zigzagueo instalado en el avión, fabricado por Menasco, P/N: 23700-3, S/N: MAL176, pasó una revisión general en HYDREP, en febrero de 1998. Posteriormente fue reparado por el mismo taller y entregado con certificado «JAA Form One» el 28-05-1999, con CSO (Ciclos desde revisión general): 1.979 y CSN (Ciclos desde nuevo): 16.227.
— La situación, en cuanto a ciclos, del componente amortiguador de zigzagueo, en el momento del suceso era: 2.795 CSO, 17.043 CSN y 816 FC desde la última inspección.

1.6.6. *Motores*

Marca:	Rolls-Royce
Modelo:	Tai 620-15
Potencial de los motores:	«On condition»

Número de serie n.° 1:	17018
Número de serie n.° 2:	17007
Horas y ciclos del motor n.° 1:	17.809 h 16.650 FC
Horas y ciclos del motor n.° 2:	20.217 h 19.233 FC

1.6.7. *El fenómeno de zigzagueo*

Se conoce por «zigzagueo» («shimmy»), el fenómeno de vibración de torsión y por flexión lateral de una pata de tren de aterrizaje.

La vibración puede aparecer por diversas causas tales como deformaciones elásticas transitorias en el impacto de las ruedas con el pavimento, fuerzas cíclicas por fuerzas centrífugas de las masas rodantes (ruedas, discos de frenos y neumáticos), rugosidad y ondulaciones en el pavimento, por oscilaciones de presión de las líneas de hidráulico del sistema de frenos y frenado diferencial entre las ruedas gemelas de una pata, blocado parcial de conjuntos de freno, etc.

La oscilación, una vez iniciada, puede autoexcitarse por la fricción entre neumático y pavimento por el efecto «cornering»[3], por el fenómeno de «hyraulic cross talk»[4], etc. Las vibraciones pueden entrar en resonancia cuando la frecuencia de la excitación se aproxima a la frecuencia natural de vibración a torsión de la pata. La energía involucrada, que oscila entre los estados de energía de deformación elástica y energía cinética de las masas vibrantes, puede alcanzar y acumular valores tan altos que lleguen a producir la rotura por excederse los límites elásticos de esfuerzos y deformaciones de los elementos estructurales.

En el fenómeno del zigzagueo juegan un destacado influjo las holguras entre las ruedas y sus ejes y entre las distintas articulaciones.

El conjunto de la pata del Fokker MK-100 tiene una frecuencia natural de vibración a torsión del orden de los 16 Hz y es sensible al fenómeno del zigzagueo, como lo son las de otros aviones de configuración semejante.

Debido a la imposibilidad de evitar absolutamente las causas de la vibración de torsión/flexión lateral, se introdujeron los amortiguadores de zigzagueo montados en el vértice común de las tijeras. Estos elementos permiten un juego lateral de las tijeras, centradas por muelle, y una amortiguación por paso de líquido hidráulico entre las cámaras izquierda y derecha del amortiguador. Se consigue con su uso que las pequeñas oscilaciones de la pata no se amplifiquen.

[3] «Cornering»: fuerzas perpendiculares a la trayectoria de una rueda originadas por un ángulo de derrape («slip angle»), formado por la trayectoria y el plano vertical de la rueda.
[4] Influencia de la modulación de la presión de una línea hidráulica en otra línea diferente.

1.6.8. *Historia de los fenómenos de zigzagueo en relación con el tren principal del Fokker MK-100*

Desde 1987, año en el que se produjo el primer accidente de un prototipo por estas causas, tras el cual se modificó la longitud de las tijeras, se han registrado otros accidentes e incidentes en los que el fenómeno del zigzagueo ha estado presente, asociado en la mayoría de los casos a problemas de montaje de las tijeras, fatiga en el cilindro superior y otras.

En 1989 se introdujo, por el SB F100-32-34, el amortiguador de zigzagueo después de que se investigara un colapso de tren izquierdo. Errores de montaje de los espaciadores en la articulación del vértice de las tijeras fueron causa de otros accidentes que dieron lugar al SB F100-32-97 y SB F100-32-113. Estos SB, de carácter recomendado, fueron elevados a Directivas de Aeronavegabilidad por las autoridades aeronáuticas y estaban incorporados en la aeronave I-ALPL.

Poco antes del accidente de esta aeronave se produjo otro de similares características que motivó la aparición del SB F100-32-114, publicado el 1 de octubre de 1999, un mes antes del accidente, por el cual se modificaba el amortiguador de zigzagueo retirando los anillos de relleno (véase punto 1.16.5), entre otras acciones. Este SB, de carácter recomendado y que posteriormente fue declarado mandatorio por una Directiva de Aeronavegabilidad, no había sido incorporado todavía en la aeronave, estando aún dentro del plazo de cumplimentación de 21 meses.

1.6.9. *Historial de mantenimiento del amortiguador de zigzagueo*

En el punto 1.6.5 ya se ha declarado que el amortiguador de zigzagueo, con un potencial de 12.000 ciclos entre revisiones generales, había acumulado 2.795 ciclos desde su última revisión general y 816 desde la última reparación en taller. Se había recargado de hidráulico en una ocasión, en las inspecciones de línea de mantenimiento, dos meses antes del accidente.

Revisión general

Los trabajos realizados sobre la unidad en febrero de 1998, en su revisión general en taller, comprendieron el desmontaje completo, la limpieza y decapado, los controles visuales y geométricos y la incorporación de unos boletines de servicio.

Entre las acciones de control geométrico, en el montaje figuró el control de la dimensión del juego entre las carcasas de culata y cuerpo que debía ser cubierto por anillos de relleno sin sobrepasar el espesor del juego. En los documentos de mantenimiento

figura esta acción como realizada, pero se da una sola medida de 0,95 mm sin detallar si se refiere a la holgura medida o al espesor de anillos de relleno instalados. Informaciones verbales posteriores indicaron que se refería al espesor de los anillos.

Entre las pruebas funcionales figura una determinada prueba de medida del flujo de líquido hidráulico, que bajo presión de 50 psi debe ser inferior a 1,9 lpm (litros por minuto). Como resultado de la prueba se indica en los documentos del taller «Bien» sin especificar el flujo hallado en la prueba. Se hace notar, asimismo, que el documento de trabajo especifica que *«el flujo... deberá ser en todo momento inferior o igual a 1,9 litros»,* usando la unidad de medida *litros* en vez de *litros por minuto* para expresar los requisitos de la prueba.

Reparación en taller

En mayo de 1999 la unidad de amortiguador de zigzagueo visitó el taller para trabajos de «*conditionnement*». En esta visita no se hicieron desmontajes ni controles dimensionales. Se hicieron las pruebas de pérdidas de hidráulico del CMM, pero no se realizó la prueba de flujo.

1.7. Información meteorológica

Los informes rutinarios de información meteorológica del Aeropuerto de Barcelona a las 13:30 y 14:00 UTC del día 7-11-1998 eran los siguientes:

1330 LEBL 25004KT 190V250 CAVOK 20/06 Q1017 NOSIG
1400 LEBL 25006KT CAVOK 19/04 Q1017 NOSIG

Esto es, vientos flojos, de 4 a 6 kt, del oeste que a las 13:30 variaban entre los rumbos 190° y 250°. La visibilidad era mayor de 10 km y no había techo de nubes. La temperatura estaba entre 19° y 20°. La humedad relativa era baja con un punto de rocío entre 4° y 6°, sin esperarse cambios significativos.

En el momento de la aproximación, la TWR comunicó a la aeronave viento en calma.

1.8. Ayudas a la navegación

En cuanto a las ayudas de senda de planeo, la pista 25 de Barcelona está dotada de ayuda visual PAPI de 3° de inclinación de senda de planeo y de sistema de aterrizaje por instrumentos ILS CAT II/III.

1.9. Comunicaciones

Se mantuvieron contactos VHF en las frecuencias 118,1 de TWR y 121,7 de GND de control en tierra.

— La primera comunicación de DLA-2708 en la aproximación final se grabó a las 13:53:35.
— Autorizado a aterrizar, DLA-2708 contestó a las 13:54:23 dando su velocidad indicada, 145 kt, a petición de TRW.
— La siguiente y última comunicación de DLA a las 13:56:23 fue «MAYDAY, MAYDAY»[5], con una alarma sonora de fondo.

Diversos registros de las comunicaciones permitieron conocer los tiempos en los que se emprendieron distintas acciones de salvamento que se recogen en el punto 1.15.

1.10. Información sobre el aeródromo

En el Aeropuerto de Barcelona existen dos pistas de vuelo cruzadas de direcciones 07/25 y 02/20, con firme de hormigón asfáltico. Las dos pistas se cruzan en un punto distante 500 m de la cabecera de la pista 25.

La pista 07/25 tiene una longitud, disponible para el aterrizaje (LDA), de 3.108 m y una anchura de 45 m. Su orientación magnética, era en las fechas del accidente, 247°. La elevación de la cabecera 25 es de 2,9 m, equivalente a 9,5 ft. La aproximación final a la pista 25 se hace sobrevolando el mar Mediterráneo y cruzando la línea de costa unos 3.500 m antes del umbral. La elevación del terreno en las áreas de aproximación final es del orden de 9 ft (véase esquema de las pistas en el Apéndice B).

1.11. Registradores de vuelo

1.11.1. *Registrador de datos de vuelo*

La aeronave disponía de un registrador de datos de vuelo digital DFDR de Sundstrand con P/N 980-4100-DXUN y S/N 4154.

En el Apéndice A se muestra una tabla de datos del DFDR desde la aproximación final hasta la parada. En la columna con el rótulo «Espacio» se hace una integración del parámetro GSPD, velocidad respecto a tierra. La escala de «Espacio» permite determinar la posición del avión, en metros desde el umbral de la pista 25, en cada instante y correlacionarlo con los fenómenos que se estaban produciendo.

[5] «MAYDAY, MAYDAY» es la llamada internacional de emergencia y petición de socorro de un avión.

Del volcado de datos registrados, con una escala de tiempos en segundos, con origen cero en el instante en el que se actúa el sensor de modo tierra, recogemos a continuación los momentos en los que se registran cambios interesantes en los parámetros de vuelo:

Tiempo (segundos)	GSPD (kt)	Parámetro (unidad)	Valor
–62	133	Radio altura (ft)	684
		Orientación magnética (°)	253,4
–9	134	Radio altura (ft)	24
–6	134	Máximo ángulo de asiento (°)	4,9
0	128	Señal modo tierra	√
1	126	Aceleración vertical (g)	1,317
2	121	Reversas desplegadas	√
4	117	Ángulo de asiento (°)	–0,2
6	110	Alabeo. Cae ala derecha (°)	11,8
		Aceleración vertical (g)	1,651
10	94	Máxima aceleración longitudinal (g)	–0,353
11	87	Máxima aceleración lateral (g)	–0,493
13	78	Orientación magnética (°)	232,1
26	33	Orientación magnética (°)	264,4
		Potencia del motor n.° 1 (EPR)	1,18
		Potencia del motor n.° 2 (EPR)	1,12
31	16	Reversas recogidas	√
35	3	Transmisión VHF	√
		Orientación magnética (°)	285,4

Vibración

El DFDR utilizado graba el parámetro de aceleración lateral con una periodicidad de un cuarto de segundo. La serie de datos tomados durante la aproximación, toma de tierra y carrera de frenado hasta la detención del avión, se muestra en forma gráfica en la Figura 1.11.1. Se puede observar que, aunque los niveles de aceleración lateral en todo momento fueron bajos, en los de la toma se incrementaron sus valores absolutos y también aumentó la frecuencia de los cambios de sentido de esas aceleraciones. Tras la rotura de la pata el avión dio varios bandazos de varios segundos de período, tendiendo a irse a la derecha. La máxima aceleración en ese sentido alcanzó casi 0,5 g, unos 13 s después de la toma.

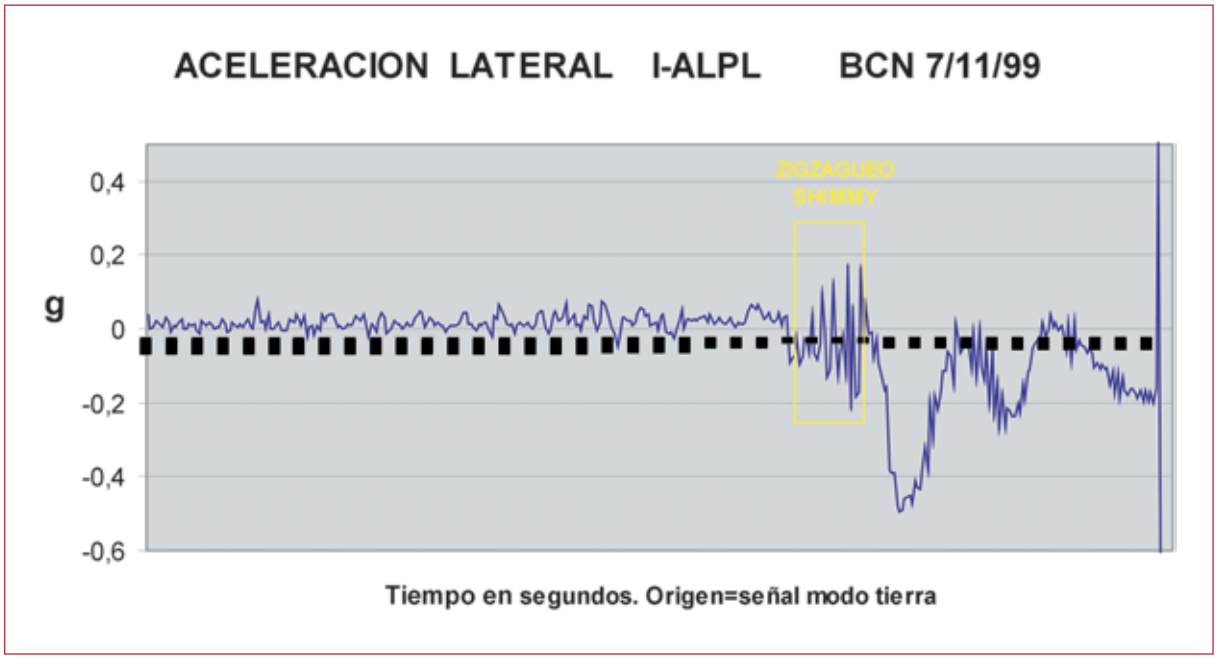


Figura 1.11.1

1.11.2. *Registrador de voces en cabina (CVR)*

La aeronave disponía de un registrador CVR Fairchild modelo A100A, P/N 93-A100-80 y S/N 60711.

La baja calidad de la grabación no permitió entender las conversaciones y sonidos grabados.

En el CVR se aprecia un golpeteo rítmico de una frecuencia entre 6 y 10 Hz antes de caer el plano derecho.

1.12. Información sobre los restos de la aeronave y el impacto

1.12.1. *Huellas en la pista del avión y los neumáticos y restos menores recogidos en la pista del aeropuerto*

No fue posible distinguir las huellas de los neumáticos en el primer contacto de las ruedas en la toma de tierra.

A unos 760 m de la cabecera de la pista 25 comenzaban unas huellas onduladas que denotan una condición de vibración sostenida de la pata derecha (véase Foto 1.12.1), que se mantienen durante 136 m, interrumpiéndose repentinamente. Al principio los

Foto 1.12.1

rastros son suaves y al final son más fuertes. Esas huellas estaban muy señaladas en los puntos de máxima elongación a uno y otro lado. Sin embargo, la huella no estaba marcada en los puntos de elongación cero. En la zona de la vibración se midieron amplitudes totales de la onda de 9 cm en el inicio y de 15 cm al final. La longitud de onda era de 2,5 m al principio y de 3 m al final.

A continuación se examinó una zona de unos 80 m de longitud de la pista en la que se recogieron diversos fragmentos desprendidos del avión por roces e impactos.

Por último, se apreciaron huellas de los neumáticos de tren de morro y de tren izquierdo que dejaron trazas semejantes a unas cicloides que se cruzaron en dos ocasiones y que continuaron hasta la detención del avión.

En todo momento el avión deslizó sobre superficie pavimentada, coincidiendo las mayores separaciones de la aeronave respecto del eje de pista con la confluencia de calles de rodadura. En su camino la aeronave arrolló una veintena de luces de baliza y un letrero. Sólo en el último momento la aeronave dejó la superficie pavimentada y entró en una isleta de hierba.

Tomando como coordenadas el eje de la pista y la línea perpendicular de umbral, se dan a continuación la posición de los restos recogidos y de las huellas, trazas y señales marcadas en el pavimento y franja de la pista:

Restos y huellas	Distancia a umbral (m)	Distancia al eje de pista (m)
Comienzan los rastros de zigzagueo de RH-MLG [2]	760	7
Finalizan los rastros de zigzagueo RH-MLG [2]	896	7
Comienzan las erosiones en el asfalto por RH-MLG	1.001	7-7,5
Roce de punta de plano; se pierden trazas de restros de tren	1.106	17
Huella del carretón de las ruedas	1.016	7-7,5
Rastro ruedas de LH-MLG y de NLG	1.166	–2
Posición final del carretón de ruedas RH-MLGTPD y «stop ring»	1.206	24
Primer cruce de rastros de ruedas: las de morro a la izquierda	1.246	4
Máxima elongación de los rastros de ruedas hacia la derecha	1.356	25
Segundo cruce de los rastros hacia la izquierda	1.436	17
Posición final de la aeronave	1.730	100

1.12.2. *Examen del avión tras el accidente*

El avión reposó finalmente en un punto situado a 100 m a la derecha de la línea central de la pista 25 y a 1.730 m de su cabecera 25. La orientación del avión era de unos 36° de guiñada a estribor respecto de la dirección de la pista. La pata derecha había colapsado y la aeronave, inclinada a la derecha, se apoyaba en el ala. El borde marginal, el flap y el alerón derecho estaban muy dañados, con pérdida de material de sus revestimientos, por la abrasión de su roce con la pista, las balizas y el terreno.

El herraje de tren del ala derecha quedó agrietado. Del cilindro superior de la pata derecha, que se había fragmentado, quedaba media caña frontal (Foto 1.12.2), unida a la estructura del ala por la articulación de extensión/retracción.

La articulación principal estaba destruida. Los otros fragmentos del cilindro se habían desprendido. Las ruedas y el cilindro inferior se habían separado.

El capó de entrada de aire y el capó lateral del motor derecho presentaban daños y perforaciones producidas por el golpe que le infligió el carretón, formado por las dos ruedas de la pata derecha montadas en el conjunto de cilindro inferior, desprendido de la pata. En esa zona de motor se produjo una pérdida de combustible durante varias horas (Foto 1.1.1).

La pata izquierda sufrió daños en los cojinetes del eje de las ruedas por los esfuerzos laterales de la aeronave.

Foto 1.12.2

1.12.3. *Examen del tren derecho tras el accidente*

Se buscaron y se reunieron casi todas las piezas principales de la pata derecha del tren y trozos de ellas. Una investigación profunda se puso en marcha organizándose un equipo de trabajo bajo la dirección de CIAIAC y con la participación del INTA, ENAC, Alpi Eagles, Messier Dowty y Fokker Services. Se describen seguidamente los resultados de la inspección preliminar y en el punto 1.16 se detallan los resultados de las investigaciones y pruebas.

Algunas piezas menores como rodamientos, sellos y anillos no pudieron recuperarse.

Cilindro superior (véanse Fotos en estas páginas y Figuras en Apéndice C)

Estaba fragmentado en unos tres trozos principales. Del trozo mayor que abarcaba media caña del cilindro se habían separado las orejetas de la articulación/fijación principal. La orejeta anterior estaba partida en dos y sus casquillos desprendidos.

El extremo inferior del trozo mayor del cilindro aparecía poco erosionado, indicando que estuvo poco tiempo en contacto con el pavimento. El borde lateral inferior del cilindro estaba más erosionado, indicando un mayor contacto con el suelo.

Otro trozo grande del cilindro superior comprendía una superficie triangular unida a la tijera superior (Foto 1.12.3). Este brazo de la tijera giraba libremente y se podía apre-

Foto 1.12.3

ciar en él alguna holgura en su unión con el cilindro superior. El cuerpo del amortiguador de zigzagueo estaba unido a la tijera.

El eje de vértice de las tijeras estaba partido por sobrecarga a flexión.

Cilindro inferior

El cilindro inferior presentaba abrasiones en el extremo superior por su contacto con la pista. En su interior permanecía el pistón de separación de la cámara de nitrógeno, que conservaba presión. Un trozo de la tijera inferior unido al cilindro inferior ofrecía resistencia a su giro y no mostraba ningún juego.

El alojamiento del cojinete superior del cilindro inferior estaba sólo ligeramente dañado. Como el cojinete va montado en el extremo superior del cilindro inferior, la posición del daño en el interior del cilindro superior indica que cuando se produjo el colapso la pata de tren estaba casi completamente comprimida, pero no se encontraron signos de haber llegado al fondo.

Conjunto de ruedas

Los neumáticos no reventaron y conservaron la presión. No se observaron defectos previos como rasponazos localizados («flat spot»). Los daños circunferenciales que presentaban fueron consecuencia del roce de la tijera superior antes de separarse.

Foto 1.12.4

Los conjuntos de ruedas (neumáticos, frenos y llantas) no presentaban anomalías o daños aparentes, aparte de los reseñados en los neumáticos, y alguna pequeña huella de impacto en las llantas exteriores.

Amortiguador de zigzagueo

El amortiguador de zigzagueo quedó, tras la rotura del eje de las tijeras, unido a la tijera superior (Fotos 1.12.3 y 1.16.3). Su cuerpo tenía algún daño, pero conservaba su integridad. El depósito de hidráulico de reserva del amortiguador se encontró arrancado y separado.

La descripción, el examen y las pruebas a las que se sometió este amortiguador se exponen en el punto 1.16.5.

1.13. Información médica y patológica

No se produjeron lesiones y no fue necesaria la atención médica posterior a los ocupantes de la aeronave.

1.14. Incendio

No se produjo incendio

1.15. Supervivencia

Configuración de cabina

La configuración de cabina de pasajeros admitía 89 pasajeros, 12 en clase «Business» y 77 en clase «Economy». La tripulación auxiliar disponía de cuatro asientos plegables o transportines: un asiento en la parte anterior del avión, otro asiento a la altura de la fila 17 y dos asientos al final, entre los dos lavabos posteriores.

Situación de pasajeros y azafatas

En el vuelo del accidente se contaban 39 pasajeros y tres auxiliares.

Los pasajeros, según la hoja de carga y centrado, ocupaban 15 de los 35 asientos de la zona A de clase «Economy» entre las filas 4 a 10, y 24 asientos de los 42 asientos en la zona B de clase «Economy», desde la fila 11 a la 22 y última.

Las auxiliares de vuelo ocupaban: un transportín delantero (F/A1), el asiento de pasajeros en la fila 14 E en el pasillo lado derecho (F/A2), y transportín trasero derecho. (F/A3). Con la clave entre paréntesis se identifica a cada uno de los auxiliares.

Localización de puertas de emergencia

Para la evacuación, el avión dispone de la puerta (1L), normal del pasaje, en la parte anterior del costado izquierdo del avión, una puerta de menor tamaño (1R) de emergencia y servicio de los galleys, en las mismas estaciones de fuselaje que la puerta de pasaje, pero en el lado derecho del avión. Además, posee cuatro salidas por portillos sobre el ala a ambos lados en las filas 12 y 14.

Declaración de emergencia y orden de evacuación

La primera alarma se dio por una estación de radio sin identificar (con acento alemán), a las 13:56:04. A las 13:56:23 la propia aeronave accidentada lanzaba su MAYDAY y el comandante ordenaba evacuar el avión.

Todos los pasajeros abandonaron la aeronave por la puerta delantera derecha 1R, deslizando por la rampa inflable. La puerta 1L se operó normalmente, pero no fue utilizada y las puertas sobre el ala no se llegaron a abrir. Se tardó menos de 3 minutos en abandonar la aeronave. Según la transcripción de la comunicación telefónica entre GND y CECOPS, a las 13:59:18 los pasajeros estaban desembarcados y ya se había posicionado una jardinera junto a ellos.

La evacuación se hizo ordenadamente y sin problemas. Los sistemas de PA y de intercomunicación funcionaron regularmente.

No hubo lesionados. Los servicios médicos acudieron al lugar del desembarco. Los pasajeros fueron trasladados al edificio terminal en las jardineras

Cuatro vehículos de incendios acudieron al lugar en pocos segundos, asegurando la aeronave con la aplicación de espuma sobre el lado derecho pues perdía combustible por la zona del motor.

1.16. Ensayos e investigaciones

Se realizaron las siguientes acciones como parte de la investigación:

— Verificación dimensional de los diámetros de distintos ejes, casquillos, bulones, etc., de acuerdo con la documentación de Dowty Rotol.
— Análisis fractográfico del cilindro superior de la pata de tren derecha.
— Investigación metalográfica y de las propiedades mecánicas del material del RH-MLG.
— Inspección detallada y pruebas funcionales del amortiguador de zigzagueo.

Estas acciones se desarrollaron en INTA, Fokker Services y NLR («Dutch Aerospace Laboratory»). Los resultados se recogieron en tres informes, de los que extraemos la siguiente información.

1.16.1. *Holguras en la articulación/soporte principal del tren derecho*

La medida de holguras en los bulones de la articulación principal y en las orejetas del cilindro superior se realizó en el INTA. El examen dimensional de los diámetros de los casquillos en herraje principal del tren en el ala se realizó en Fokker Services.

Las holguras encontradas, en general dentro de tolerancias, estaban próximas al límite superior permitido. Algunas medidas en el cilindro superior de diámetros de los casquillos en la orejeta anterior de la articulación del tren, alcanzaron los 57,835 mm cuando el máximo desgaste permitido es de 57,22 mm. Esta orejeta fue la que se fracturó en dos mitades al colapsar el tren (véase figura C.7 en el Apéndice C).

1.16.2. *Análisis de la fractura del cilindro superior*

Se inspeccionaron visualmente las superficies de las fracturas con la ayuda de medios ópticos de bajo poder de aumento y se encontraron varios puntos de iniciación de las grietas.

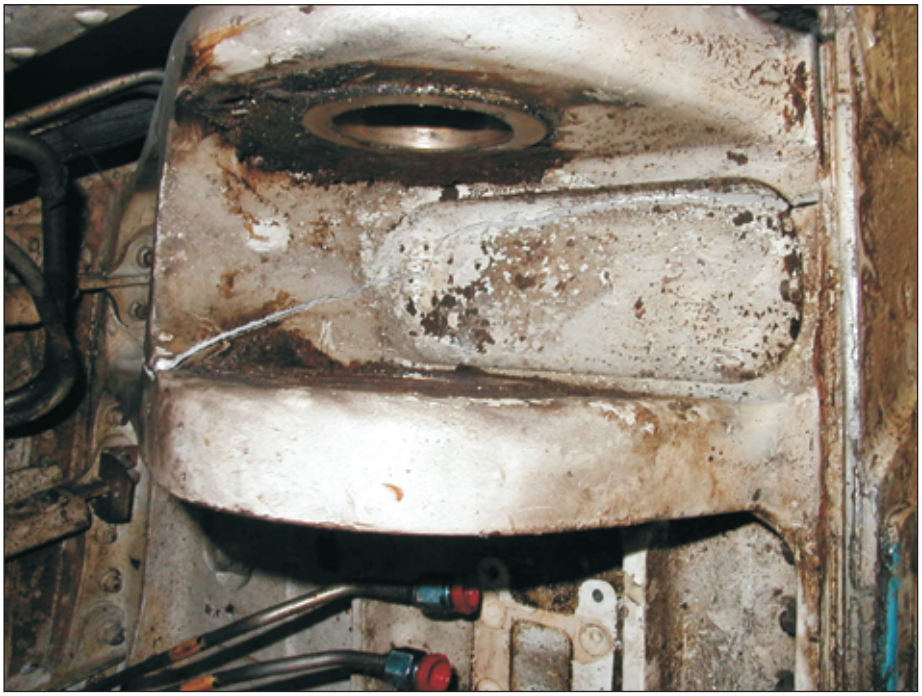


Foto 1.16.1

La grieta, que se supone fue la grieta primaria inicial, se localizaba en la superficie exterior del cilindro adyacente a la orejeta derecha de la articulación de la tijera superior. En esa sección se dan los mayores esfuerzos de diseño en el caso de flexión local debida a la torsión introducida por las tijeras. Desde ese punto la grieta corrió hacia arriba y hacia abajo.

La grieta se produjo por sobrecarga y no se encontró evidencia de un daño preexistente de fatiga, corrosión o forja.

En el lado opuesto, lado izquierdo del cilindro, se inició una segunda grieta que arrancaba más cerca del borde inferior y en la superficie interior del cilindro, sugiriendo que se produjo a causa de la misma torsión, transmitida por las tijeras cuando la grieta ya había partido el lado derecho, y por la flexión local. Esta segunda grieta creció, así mismo, hacia arriba y hacia abajo.

Se observaron otras dos grietas secundarias en los fragmentos del cilindro superior, causadas por el empuje del cilindro inferior, posiblemente cuando el cilindro superior se abrió.

También las orejetas de la articulación principal del cilindro superior rompieron por sobrecarga.

Aparte de la rotura de las orejetas de la articulación principal, el tipo de daño observado en este tren de aterrizaje es típico en el caso de fallo por torsión-flexión originado por un fenómeno de zigzagueo.

En la Foto 1.16.2 se ven los fragmentos reunidos con indicación del sentido de crecimiento de las grietas. En las Figuras C.2 y C.3 del Apéndice C se pueden ver dibujos de líneas de grietas y fragmentación del cilindro superior.

1.16.3. *Análisis de la fractura del herraje de ala*

El herraje de ala del RH-MLG se inspeccionó en Fokker Services. Las grietas encontradas se produjeron a causa de cargas extremadamente altas en dirección hacia atrás.

Las grietas se iniciaron en el agujero posterior, soporte de los casquillos del bulón de la articulación, en su nervio inferior izquierdo. Aunque el agujero presentaba una fuerte corrosión, se supone que no contribuyó en la iniciacion de las grietas.

Se consideró que el estado de la fijación/articulación principal del RH-MLG era satisfactorio para sus horas de servicio.

1.16.4. *Análisis del material del cilindro superior en el INTA*

El material de fabricación del cilindro superior es la aleación ligera DTD 5094 para piezas forjadas según normalización inglesa. Los análisis químicos, la estructura metalográfica adecuada a un tratamiento T7xx, conductividad eléctrica, dureza Brinell e incluso resistencia a la tracción de una probeta extraída de la zona cilíndrica, dieron resultados acordes con los valores normalizados en los análisis realizados en el INTA.

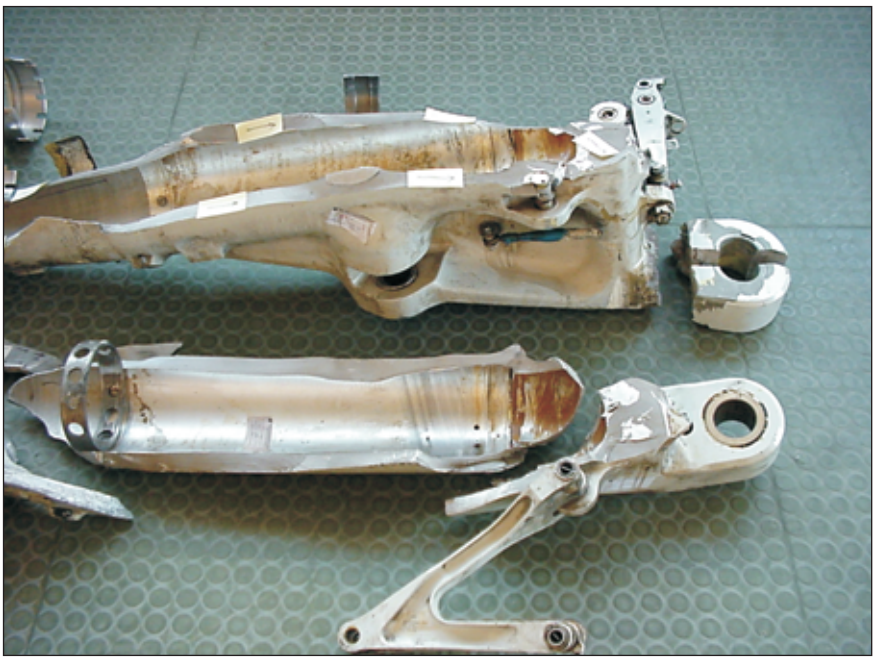


Foto 1.16.2

Foto 1.16.3

1.16.5. *Amortiguador de zigzagueo: desmontaje y pruebas funcionales*

El amortiguador de zigzagueo está constituido por un cuerpo y una culata unidos por 10 tornillos formando una carcasa, dentro de la cual se mueve un pistón centrado por arandelas elásticas «belleville» que actúan como un muelle a compresión a cada lado (véase despiece en la Figura C.6 del Apéndice C). El pistón conectado a las tijeras por el bulón de vértice común a ellas tiene posibilidad de desplazamiento axial en los dos sentidos de 5,89 mm. Su movimiento está amortiguado por el paso del líquido hidráulico de uno a otro lado del pistón, a través de válvulas y restrictores.

La holgura o juego entre los frentes del cajeado del cuerpo y culata se llenaba con anillos de relleno (véase Figura C.5 en Apéndice C).

No se pudo precisar el contenido de hidráulico antes del accidente por la rotura de la unión de su depósito de reserva. Presentaba, además, otros daños menores, pero se consideró que podían ser reparados para evaluar funcionalmente su contribución al accidente. Se decidió reconstruirlo en una forma controlada, de tal modo que pudiera ser probado en la misma condición en la que se encontró y comparar su funcionamiento en otras condiciones próximas a las normales de diseño.

Inspección visual y dimensional

Una primera inspección en el INTA puso de manifiesto tres anomalías:

— El par de apriete, medido al aflojar los tornillos, de unión de las dos partes de la carcasa tenía un valor medio un 40% inferior al nominal especificado en el CMM.

— Una de las arandelas muelle o elásticas, «belleville», estaba partida por fatiga, sin que se desprendiera ninguna partícula de su superficie.
— El juego entre cuerpo y carcasa medido bajo un torque de 70-80 lb-in, se encontró que variaba entre 0,75 y 0,82 mm (véase figura C.5 en el Apéndice C).
— El espesor de los anillos de relleno medido fue de 0,95 a 1,06 mm.
— Por tanto, el espesor de los anillos de relleno («shims») de montaje de las semicarcasas era superior en 0,15 a 0,20 mm a la holgura entre los frentes del cajeado de las carcasas. El manual del componente prescribía que ese espesor debía ser inferior a la holgura con tolerancia (+0; –0,076 mm), y que ha de medirse con el par de apriete especificado (CMM punto «ASSEMBLY, 2.A.(8)»).

Pruebas funcionales en banco hidráulico

En las instalaciones de Fokker Services se efectuó la prueba de flujo en banco hidráulico prevista en CMM punto «TESTING, 1.C.(1)». El flujo medido fue de 2,93 l/min, cuando el máximo flujo permitido es de 1,9 l/min. Se comprobó, mediante montajes alternativos sin anillos de relleno y con el par de apriete apropiado, que el exceso de flujo se debía al excesivo espesor del paquete de anillos de relleno.

Pruebas funcionales de excitación dinámica

Para posibilitar las pruebas se reparó la unión del cuerpo del amortiguador con su depósito de reserva de hidráulico, con racor roscado a sobremedida.

Se hicieron distintas series de pruebas del amortiguador tal como se encontró (con excesivo espesor de anillos de relleno, bajo par de apriete y presencia de una arandela muelle partida) y con las anomalías de la arandela muelle y par de aprietes corregidas y sin anillos de relleno. En esas pruebas, la amplitud de la vibración que se indujo fue de 5 mm y la frecuencia se varió de 8 a 28 Hz. Un informe de Fokker Services adjunta gráficos de la actuación del amortiguador a frecuencias de 8, 16 y 20 Hz en la condición encontrada en el accidente y en otras configuraciones de ensamblaje para comparación (véanse gráficos en Apéndice D con los resultados comparativos de las pruebas a 20 Hz).

Los resultados de las pruebas demostraron que:

— Con frecuencias mayores de 16 Hz el amortiguador en la configuración del accidente tenía una capacidad de amortiguación muy inferior, menos del 50%, de la que tenía el amortiguador en la configuración que cumplía con los requisitos de la prueba funcional CMM 1.C (1).
— El defecto de una única arandela partida no tuvo influencia en la capacidad de amortiguación.
— El aumento del par de apriete no mejoró las actuaciones del amortiguador en configuración de excesivo espesor de anillos de relleno.

1.17. Información orgánica y de dirección

1.17.1. *Visita a la pista del Aeropuerto de Barcelona*

Los investigadores del accidente solicitaron permisos de paso para inspeccionar la zona del aeropuerto donde se produjo el suceso. No se les facilito la entrada a la pista 07/25 hasta la madrugada del día 9 con condiciones de iluminación deficiente para la labor que desempeñaban. No tuvieron ocasión de visitar la zona con luz diurna hasta pasados cuatro días.

1.17.2. *Normativas referentes al proyecto de aeródromos OACI*

Como referencia sobre posibles condiciones de los pavimentos de las pistas de los aeródromos que pueden tener relación con el fenómeno del zigzagueo, anotamos las siguientes:

En el Manual de Proyecto de Aeródromos, Parte 1, Pistas, de OACI (2.ª edición, 1984), párrafo 5.1.14, se puede leer: «*... El acabado de la superficie de la capa de rodadura debe ser de tal regularidad que, cuando se verifique con una regla de 3 m colocada en cualquier parte y en cualquier dirección de la superficie, no haya en ningún punto, excepto a través de la cresta del bombeo o de los canales de drenaje, una separación de 3 mm entre el borde de la regla y la superficie del pavimento*».

También en el párrafo 5.1.16 se dice que «*Los movimientos de las aeronaves y las diferencias de asentamiento de los cimientos, con el tiempo tienden a aumentar las irregularidades de la superficie. ... Una secuencia de ondulaciones superficiales en la pista, cada una de las cuales se considere aisladamente como aceptable, podría inducir cargas dinámicas importantes en el tren de aterrizaje de la aeronave, o vibraciones intensas que podrían afectar la lectura de los instrumentos del puesto de pilotaje*».

2. ANÁLISIS

2.1. Vuelo, aproximación y toma de tierra

El vuelo había sido normal en todo momento. La operación en Barcelona era típica para esa compañía y todas las condiciones ese día eran favorables. Posiblemente los pilotos se sintieran acuciados por el tráfico que les seguía en la senda de aterrizaje, probablemente de mayor velocidad que la propia, por lo que aumentaron algo su velocidad de planeo respecto a la de referencia para su peso, para facilitar la operación del otro vuelo. La diferencia entre las velocidades CAS y las velocidades GS hace presumir una componente de viento en cara de 4 kt. El ángulo de guiñada resultante de la orientación magnética (253°), que se observa en el DFDR, respecto de la orientación de la pista (247°), puede hacer sospechar una pequeña componente de viento del costado derecho. Ambas desviaciones de velocidad y de orientación son ligeras y normales en una aproximación, que en este caso se hizo con velocidad estabilizada y siguiendo la pendiente normal de la senda de planeo. Efectivamente, 3.736 m antes del umbral el avión tenía una altura de 684 ft sobre el mar, y aproximadamente 674 sobre la cabecera de la pista. Con esos datos se puede calcular una senda real de planeo de 3,1° y se puede suponer que siguió la ayuda visual del PAPI 3 y la aproximación instrumental ILS.

Podemos calcular que el avión sobrevoló el umbral de la pista con 18 ft de altura atendiendo a los registros de DFDR y la integración de las velocidades obtenida de esos registros.

La recogida («flare») fue suave. Durante cinco segundos antes de la toma de tierra se registraron valores cero de radioaltura.

En el momento de la toma se originó una aceleración vertical máxima registrada en dos octavos de segundo de 1,317 g, que se puede calificar de aceleración suave y ligera en esa fase de la operación.

El punto del primer contacto de las ruedas con la pista se calcula con los datos del DFDR, que estaba a 560 m del umbral, en vez de los aproximadamente 300 m que estimaba el piloto.

En el momento del contacto con tierra la aeronave estaba perfectamente orientada con la pista.

2.2. Frenada y control del avión en la carrera de aterrizaje

Después del primer contacto, y al bajar el morro, el piloto sintió vibraciones durante unos segundos y bandazos que complicaron el control lateral del avión en tierra. Luego, el colapso del tren derecho imprimió una tendencia fuerte a desviarse a la derecha. Al principio de la carrera, con suficiente velocidad y mando aerodinámico, se pudo mantener el avión den-

tro de los 45 m de anchura de la pista consiguiendo que el avión guiñase a la izquierda más de 15° para tratar de recuperar el centro de la pista. La frenada fue relativamente pobre, con reversas en ralentí, desplegadas en los segundos iniciales de la toma. Después, con velocidades del orden de 30 kt (GS), el piloto utilizó empuje asimétrico, aumentando el del motor izquierdo en reversa, aunque no pudo evitar que el avión derivara hacia la derecha. Se salió de la pista y entró en una isleta de hierba. Su orientación al final de la carrera era de unos 36° a la derecha respecto de la orientación del eje de pista.

La aceleración longitudinal media en la frenada fue del orden de –0,187, calculada como la aceleración uniforme que puede anular aproximadamente en 1.730 m una velocidad de 128 kt, o bien, anular esa velocidad en 36 s. Ese valor de aceleración es bajo respecto de los normales, pero se debe tener en cuenta que la fricción ala/asfalto es menor que la del neumático y que la modulación de la potencia en reversa fue empleada más en el control lateral del avión que en detenerlo.

Efectivamente, las longitudes normales de 830-1.383 m se vieron superadas en este aterrizaje, que sobrevoló el umbral con 18 ft solamente, en vez de los 50 ft que se toman en el cálculo teórico de la longitud necesaria de acuerdo con las regulaciones. Por el contrario, la mayor velocidad de aproximación aumentaría ligeramente la carrera.

2.3. Evacuación del avión y salvamento

Cabe destacar que sólo se utilizó la puerta 1R, de menor altura que la 1L. Seguramente, su menor altura respecto del suelo y la inclinación lateral del piso de la cabina (al estar el avión escorado hacia ese lado derecho), indujeron a los ocupantes a evacuar el avión por el lado más bajo y aparentemente de más fácil franqueamiento.

La azafata F/A2 se sentaba, como suele ser recomendado, próxima a las salidas de ala, aprovechando que el avión tenía asientos de pasaje disponibles. Sin embargo, en otros vuelos, con avión lleno de pasajeros, la versión de configuración 000/012/77 desplazaría a la azafata al transportín trasero.

Los pocos pasajeros, la integridad del fuselaje, la ausencia de fuego y la posición final del avión en el centro del aeropuerto facilitaron el salvamento.

Control reordenó el trafico y en pocos minutos pudo comenzar a permitir tanto las arribadas como las salidas por la pista 02/20, después de que se comprobara que el cruce de las pistas estaba libre de restos y de obstáculos desprendidos del avión. En efecto, el cruce de las pistas se encuentra a unos 500 m de la cabecera 25 y el avión tocó más allá del cruce.

Se observa, sin embargo, que normalmente predominan los criterios de completa operatividad en los Servicios de Tránsito Aéreo, dificultándose el ejercicio de otras actividades.

En este caso, por mantener la operatividad del aeropuerto no se facilitó la entrada en la pista de los investigadores del accidente, con luz diurna, hasta pasados cuatro días. El retraso en el inicio de las investigaciones en ese período pudo dar lugar a que desaparecieran huellas por el uso de la pista y por las acciones de mantenimiento desarrolladas en ella.

2.4. Estado de mantenimiento

2.4.1. *Mantenimiento programado*

El avión había pasado las revisiones programadas, tenía incorporados los SB mandatorios relativos al tren y en el día a día se le habían realizado las inspecciones de tránsito y de servicio requeridas.

2.4.2. *Mantenimiento en línea*

El historial de partes de vuelo muestra algunas entradas de defectos encontrados y corregidos en relación con el zigzagueo:

— La recarga de fluido hidráulico del amortiguador de zigzagueo, efectuada en septiembre anterior, puede hacer pensar que el amortiguador estuviera otra vez seco. Esa suposición no está avalada por la primera inspección del amortiguador, pues pudo perder el líquido tras el accidente al desprenderse su depósito de reserva. Un punto de la inspección diaria de servicio pide comprobar el nivel de líquido hidráulico del amortiguador de zigzagueo. Esa sencilla inspección se realizó en distintas bases de mantenimiento en los días precedentes por técnicos distintos. Se estima que es muy improbable que se pueda consumir el líquido en la operación de unos días y que no se hiciera la inspección correctamente varios días sucesivos. Por otro lado, como ya las pruebas del amortiguador dieron resultado deficiente en la configuración que tenía, no hay por qué presuponer otra anomalía.
— Los cambios recientes de conjuntos de frenos pudieron alterar las condiciones de equilibrado de esas ruedas de tren principal derecho. No obstante, no se encontraron anomalías concretas en estos elementos que puedan hacer pensar que pudo existir una relación directa entre esos cambios y la aparición de la vibración de zigzagueo.

2.4.3. *Holguras y desgastes en articulaciones principales*

La proximidad del límite de ciclos para la revisión general del tren de aterrizaje se constata en el desgaste de las articulaciones principales medidas en el RH-MLG. Efectivamente, se encontraron algunas mediciones en el límite de las tolerancias.

En cuanto a las holguras excesivas encontradas en el casquillo de la orejeta anterior del cilindro superior, pudieron ser efecto y consecuencia de las elevadas cargas y de la propia rotura de la orejeta en el accidente; a causa de esa rotura, los casquillos se quedarían sin soporte y se agrandarían. La holgura sentida al tacto en la tijera superior con el cilindro pudo también ser consecuencia de sus golpes con la rueda y la pista.

2.4.4. *Mantenimiento del amortiguador de vibraciones en taller*

Aparentemente, y atendiendo a la documentación aportada, durante la visita al taller para revisión general se realizaron sobre el amortiguador de zigzagueo las mediciones, los montajes y las pruebas funcionales previstas en el CMM.

En el procedimiento de montaje se especificaba que se había de medir la holgura en el cajeado de las carcasas y que se había de instalar un paquete de anillos de espesor igual a aquel con tolerancia +0/–0,076. Sin embargo, en las mediciones de taller sólo se encuentra un valor que tanto puede corresponder a la holgura como al espesor del paquete de anillos de relleno, aunque aclaraciones posteriores confirmaran que se referían al espesor instalado. También se ha visto que las mediciones del espesor de anillos de relleno tras el accidente coinciden con la única medición en revisión general.

En definitiva, las medidas dimensionales tomadas tras el accidente del paquete de anillos de relleno descubrieron un espesor de anillos de 0,15 a 0,20 mm, fuera de la tolerancia (+0; –0,076 mm), mayor que la holgura medida.

De igual modo, no se ha encontrado razón de la discrepancia entre el resultado de la prueba de flujo realizada en taller tras la revisión y el de la prueba de la investigación del accidente.

En esa prueba se debe obtener un flujo igual o menor a 1,9 lpm. En la prueba realizada tras el accidente el flujo medido fue de 2,93 lpm. En la prueba de taller, tras la reparación no se consigna un resultado cuantitativo; tan sólo se expresa que está «bien».

En cuanto al empleo en el documento de trabajo de las unidades del sistema de medida *litros* para expresar un flujo, en lugar de *litros por minuto,* no se estima, en principio, que pudiera dar lugar a confusión del personal técnico familiarizado con el componente.

El informe de reparación no indica la anomalía o defecto que provocó su prematuro desmontaje, probablemente de otro avión. Las acciones de mantenimiento en taller no descubrieron las discrepancias internas de su configuración.

Por lo enumerado en este punto se emiten dos Recomendaciones de Seguridad dirigidas a la organización de mantenimiento en la que se realizaron los trabajos de mantenimiento del amortiguador de zigzagueo.

2.5. Vibración de zigzagueo

Es evidente que el tren de aterrizaje derecho sufrió vibraciones de zigzagueo por la impronta de los neumáticos dejada en la pista. Los antecedentes de otros casos sufridos por ese tipo de avión lo reafirman. La observación de la gráfica de aceleración lateral del avión (véase gráfico en punto 1.11.1) muestra que hubo vibración desde el primer contacto de las ruedas con la pista, aunque con amplitud inicial casi imperceptible. Esa vibración se amplifica progresivamente y dura al menos 6 s hasta que se produce la rotura de la pata. Las marcas de zigzagueo en la pista duran sólo 136 m, es decir, poco más de los dos últimos segundos, a la velocidad a la que iba el avión.

No sabemos si en vuelos anteriores hubo zigzagueo. Habiéndose determinado que la arandela muelle que rompió lo hizo por fatiga, se puede tomar como un indicio de que en los 816 ciclos anteriores, montado en el avión I-ALPL, o en los 1.979 ciclos volados en su anterior posición tras la revisión general, se produjeron en ella repetidamente deformaciones máximas.

La velocidad del avión cuando se marcaron en la pista las primeras huellas de zigzagueo era de 120 kt. Cuando se imprimieron en la pista las últimas huellas de zigzagueo, la velocidad era de 110 kt. En uno y otro instante la longitud de la onda impresa en el suelo fue de 2,5 m y de 3 m, respectivamente. Se puede calcular la frecuencia de la vibración como velocidad/longitud onda. Se puede entonces estimar que la frecuencia de la vibración de zigzagueo, cuando su amplitud era lo suficientemente grande como para dejar huellas por derrape en el asfalto, era de 25 Hz. Cuando la amplitud de la vibración hizo que el cilindro exterior rompiera por sobrecarga, la frecuencia era de 19 Hz.

La amplitud total de la onda dejada en el suelo de hasta 15 cm, es decir de 7,5 cm a cada lado, correspondería a la suma de la deformación del neumático, flexión de la pata y torsión, y a un desplazamiento lateral del avión completo.

La aceleración lateral grabada en el DFDR es la del avión en conjunto. Se toman cuatro valores por segundo de ese parámetro, mientras que la vibración se repite unas 20 veces por segundo. La máxima aceleración grabada fue de 0,21 g, pero seguramente en el muestreo grabado no se registró la máxima que se produjera en la masa del avión completo. De todas formas, se puede estimar que en los neumáticos de la pata derecha se generaron fuerzas laterales del orden de 7.500 kg, alternativamente a la derecha y a la izquierda, debidas a ángulos de derrape («slip angle») elevados. El pivotamiento de los neumáticos respecto de la trayectoria, que origina el ángulo de derrape, se debe a las deformaciones elásticas de torsión en la pata y en los neumáticos, y a las holguras de los ejes y articulaciones.

El origen o desencadenante de la vibración no es evidente. Los neumáticos no tenían defectos localizados en su perímetro, como rasponazos («flat-spot»), que pudieran desequilibrar la rueda. Sin embargo, la longitud de la onda impresa en el suelo, de 2,5

a 3 m, está suficientemente próxima a la longitud del perímetro de la rueda como para pensar en un origen cíclico de la vibración. El diámetro exterior de la rueda de tren principal del Fokker 100 es, en efecto, de 40 pulgadas, equivalentes a 1.016 mm. Su perímetro es entonces de 3,18 m.

La actuación de los frenos y el antiskid se pueden descartar como causa de la vibración inicial. Efectivamente, las primeras marcas de zigzagueo muestran derrape de las ruedas cuando el ángulo de derrape es grande y no quedan marcadas cuando el ángulo es nulo, porque rueda libremente. Esto es señal de que no iban frenadas en los instantes iniciales de la toma.

Parece que las holguras eran normales. Sin embargo, el recorrido del pistón del amortiguador de zigzagueo, no suficientemente restringido por causa de sus deficiencias internas, actuaba como una holgura añadida.

No hay indicios para sospechar la existencia de eventuales ondulaciones de la propia pista de Barcelona. Se supone, en general, que los criterios de construcción y de mantenimiento de los aeródromos son adecuados; aun así, sorprende que se elija como longitud de la regla de tres metros para verificar defectos en la superficie de pista, pues esa longitud es próxima a la que puede producir vibraciones peligrosas a alta velocidad.

2.6. Secuencia de las roturas

Se describe, a continuación, en orden cronológico, cómo se entiende la aparición del fenómeno de zigzagueo y la secuencia de las roturas provocadas en la pata del tren derecho:

— Al revolucionarse en la toma las ruedas de la pata derecha, empiezan a vibrar a torsión.
— El pequeño ángulo de derrape, a uno y otro lado, induce fuerzas laterales, con coeficientes de rozamiento altos entre neumáticos y pista, por estar la pista seca.
— La suavidad de la toma, en una larga recogida, evita que el propio peso del avión cargue sobre las articulaciones del tren. Los rozamientos internos en las articulaciones son reducidos y la amortiguación natural del conjunto es baja.
— La vibración se amplifica al ir acumulando energía de deformación el conjunto de la pata a cada ciclo de vibración, por el impulso de las fuerzas laterales que aparecen en los neumáticos, alternativamente a uno y otro lado.
— Las tijeras transmiten los esfuerzos correspondientes a las deformaciones elásticas, a las orejetas del cilindro superior. Estos esfuerzos combinados con los esfuerzos locales de flexión rebasan el límite elástico del material en un punto lateral de ese cilindro, en la superficie exterior, próximo a la orejeta derecha de la tijera superior.
— Instantáneamente, desde ese punto la grieta que se origina corre hacia arriba y hacia abajo por el lado derecho del cilindro.

— Cuando la grieta llega al borde inferior del cilindro, la flexión y torsión originan otra grieta en el lado izquierdo, en la superficie interior. Al correr esa grieta y juntarse con la del lado derecho, se desprende un trozo del cilindro con la tijera superior y el cilindro inferior se queda sin apoyo. Se pierde el líquido hidráulico del cilindro.
— El conjunto de cilindro inferior y ruedas se separa por la abertura producida en el cilindro superior, rompiendo el bulón de vértice de las tijeras.
— La compresión de las ruedas contra el suelo provoca su rebote y saltan hasta golpear los capós del motor derecho situado en la cola del avión.
— El avión cae, sin las ruedas del lado derecho, y el muñón del semicilindro exterior, que permanece amarrado, golpea el suelo. En ese golpe seco se rompen las orejetas de la articulación principal y la del martinete de retracción y se desprenden otros trozos del mismo.
— Lo que queda del cilindro exterior, la media caña frontal, cuelga de la riostra lateral y del mecanismo de retracción, y arrastra sin resistencia por el suelo.
— El avión, en su carrera, se apoya en el tren izquierdo y en la punta del plano derecho que arrastra sobre la pista y arrolla una serie de balizas, próximas entre sí, en la confluencia de la pista con la salida C-A. Incidentalmente, la señal rítmica de 6 a 10 Hz registrada por el CVR pudo recoger los golpes con las balizas.

2.7. Análisis de las causas

2.7.1. *Origen de la vibración*

La iniciación de una vibración de zigzagueo puede deberse a muchas y diferentes causas. De las analizadas en relación a este caso, ninguna ha parecido concluyente a su contribución. Se debe considerar que el zigzagueo es un fenómeno aleatorio de mayor o menor virulencia dependiendo de las causas y circunstancias que confluyan.

2.7.2. *Fallo funcional del amortiguador de zigzagueo*

Sin embargo, sí se ha podido determinar que el amortiguador de zigzagueo no cumplía satisfactoriamente su cometido. Este amortiguador debe contener la amplitud de las inevitables vibraciones a un nivel soportable. La unidad que montaba la pata derecha del avión conservaba alguna capacidad de amortiguación remanente, lo que explica que haya podido aguantar 816 ciclos desde la reparación en taller del amortiguador, pero, en este caso, fue incapaz de acotar eficazmente la intensidad de las vibraciones.

La investigación subsiguiente ha podido determinar que la causa del mal funcionamiento era la existencia de una derivación del flujo de líquido hidráulico en su interior causada por un exceso de anillos de relleno en el acoplamiento de las dos carcasas de cuerpo y culata (véase Figura C.5 en el Apéndice C). La solución, ya propuesta por el fabricante

en un reciente SB, de eliminar esos anillos de relleno, es adecuada según los resultados de estas pruebas.

Otra anomalía detectada fue el insuficiente par de apriete de los tornillos que unen las carcasas. Aunque las pruebas funcionales no han confirmado la contribución de esta discrepancia en el poder de amortiguación, se ha prestado atención a esta característica, pues influye en la medida interior del cuerpo y en la integridad del conjunto. Por otro lado, no se debe pasar por alto que se midió el par de apriete aflojando las tuercas; obviamente, la lectura del torquímetro puede ser diferente apretando y aflojando una tuerca.

Un informe de Fokker Services adjunta gráficos de las pruebas de excitación a las que fue sometido el amortiguador en la configuración del accidente a frecuencias de 8, 16 y 20 Hz. Aunque se menciona que se hicieron otras pruebas a frecuencias de hasta 28 Hz, no se han publicado los resultados en ese informe. Se debe considerar que la frecuencia a la que se inició el zigzagueo fue superior a 25 Hz y que se ha de lograr disipar energía y amortiguar la vibración cuanto antes. El aumento de la amplitud de la vibración es un proceso acumulativo que se debe neutralizar cuanto antes para no alcanzar una situación dinámicamente divergente.

Las pruebas funcionales en banco hidráulico también confirmaron que en la configuración del accidente el amortiguador no cumplía los requisitos de flujo especificados en CMM. Cuando el componente se revisó en taller, y fue montado y probado, es de suponer que tampoco cumplía la prueba de flujo, pues tenía esa misma configuración de anillos de relleno usada en la prueba posterior al accidente. Eliminando los anillos de relleno en las pruebas complementarias, volvía a cumplir los requisitos de flujo. Por lo cual se considera que no hubo degradación, en las válvulas y pasos internos del fluido hidráulico, a la que se le pudiera atribuir el flujo alto.

2.7.3. *Técnicas de vuelo*

Los procedimientos y técnicas de vuelo fueron en todo momento correctos y normales. La flotación sobre la pista en la recogida pudo influir en una menor amortiguación natural del fenómeno de zigzagueo. El peso del avión sobre los elementos de la pata del tren de aterrizaje, y entre los neumáticos y el suelo, aumenta los rozamientos internos y limita la amplitud de la oscilación de torsión. Al mismo tiempo, el rozamiento aumenta la disipación de energía que debe amortiguar todo movimiento oscilatorio antes de que se alcance una amplitud grande de la vibración que hace el movimiento inestable.

3. CONCLUSIÓN

3.1. Conclusiones

1. El tiempo era bueno; las condiciones meteorológicas no influyeron en el accidente. La pista 25 de Barcelona estaba seca.
2. El vuelo de aproximación y el aterrizaje fueron normales hasta el instante de poner el avión las ruedas en el suelo.
3. El avión siguió la senda de planeo estándar de las ayudas, de pendiente 3°, con una velocidad indicada (IAS) igual a la velocidad de referencia más 9-14 kt y cruzó el umbral de la pista a unos 18 ft, aproximadamente.
4. La aeronave puso las ruedas a unos 560 m desde el umbral, después de una recogida suave de 5 s de duración. La orientación era exactamente la de la pista. La velocidad respecto del suelo era en ese momento 128 kt (GS).
5. El piloto a los mandos era el copiloto y volaba en manual, sin conectar el piloto automático.
6. Momentos después del primer contacto de las ruedas se inició una vibración, cayó el ala derecha y el avión dio bandazos, tendiendo a irse hacia la derecha. Entonces el comandante tomó el control del avión. La pata derecha del tren principal colapsó y el avión arrastró su ala derecha por la pista arrollando varias balizas de borde de pista y de señalización de calles de rodadura.
7. Los frenos aerodinámicos de tierra se desplegaron normalmente.
8. Se utilizó empuje de reversa en ralentí para frenar y empuje de reversa asimétrico, aumentando el EPR del motor izquierdo hasta 1,183, para intentar dirigir el avión en su carrera de aterrizaje.
9. El avión paró a 1.730 m desde la cabecera de la pista (1.170 m desde el punto estimado de primer contacto), y a 100 m a la derecha del eje de pista, con una orientación de 36° a la derecha de su sentido, y escorado hacia la derecha. El ala derecha descansaba en el suelo.
10. Los capós del motor derecho recibieron el golpe de las ruedas del tren de aterrizaje, que se separaron.
11. Por la zona del motor se produjo una pérdida de combustible pequeña, pero no hubo incendio.
12. Los 39 pasajeros y los 5 tripulantes evacuaron el avión por la puerta 1R en un par de minutos
13. El RH-MLG experimentó un fenómeno de zigzagueo, que se inició en cuanto el avión se apoyó en el suelo y que dejó su impronta señalada en la superficie de la pista durante 136 m.
14. La vibración de zigzagueo se amplificó hasta que se produjo el colapso del cilindro superior de la pata de tren derecho.
15. El examen metalúrgico, metalográfico y fractográfico del cilindro de la RH-MLG aseguró que no había defectos preexistentes en el material (composición quimica, estructura, temple, propiedades mecánicas, corrosión, fatiga, etc.) que pudieran haber debilitado la pieza.

16. Se estima que la frecuencia de la vibración fue de unos 25 Hz al principio de la impronta de las señales de zigzagueo en la pista, y de 19 Hz cuando colapsó la pata.
17. Se encontró que el amortiguador de zigzagueo no funcionaba correctamente y, por tanto, no podía amortiguar la vibración aparecida.
18. Durante la investigación se ha comprobado que el amortiguador de vibración es muy sensible a la dimensión de la longitud interior de su cámara.
19. El tipo de avión MK-100 tiene un historial de sucesos en los que ha intervenido el fenómeno de zigzagueo y se han publicado diversas Directivas de Aeronavegabilidad y Boletines de Servicio del fabricante.
20. El último SB publicado, referente al zigzagueo, un mes antes de la fecha del accidente, no estaba cumplimentado. Su plazo de cumplimentación era de 21 meses. Dicho Boletín fue publicado también como AD por la autoridad aeronáutica de certificación del avión (RLD de los Países Bajos).

3.2. Causas

1. La aeronave sufrió el accidente por rotura del cilindro superior del RH-MLG.
2. La causa de la rotura del cilindro superior fue la exposición a cargas mecánicas superiores a las cargas para las que fue diseñado el componente. Las cargas se debieron a una vibración de zigzagueo.
3. La vibración se hizo inestable por fallo funcional del amortiguador de zigzagueo.
4. La baja capacidad de amortiguación del amortiguador de zigzagueo se debía al mayor espesor de un paquete de anillos de relleno, entre el cuerpo y la culata, que forman la carcasa del amortiguador.
5. El montaje defectuoso no se puso de manifiesto en una preceptiva prueba de flujo en banco hidráulico.
6. Pudo contribuir al defecto de montaje la propia existencia de los anillos de relleno, que se ha demostrado que no tienen ninguna funcionalidad en el diseño.
7. Pudo contribuir en la deficiente funcionalidad del amortiguador un eventual bajo par de apriete en los tornillos que unen las dos carcasas que forman el cuerpo del amortiguador.
8. Pudo contribuir en la aparición del fenómeno de zigzagueo la suave toma que hizo el avión, combinado con un alto coeficiente de fricción, correspondiente a la pista seca en la que operaba.

4. RECOMENDACIONES SOBRE SEGURIDAD

REC 38/04. Se recomienda a la organización de mantenimiento Hydrep que refuerce su control de calidad interno y las inspecciones y/o auditorías de calidad con el fin de asegurar la idoneidad de la metodología y procedimientos de mantenimiento de los trabajos llevados a cabo en el taller, para garantizar la ejecución correcta de las mediciones y pruebas impuestas por el CMM («Component Maintenance Manual») del fabricante.

REC 39/04. Se recomienda a la organización de mantenimiento Hydrep que mejore la formación de su personal técnico para la realización de las pruebas del CMM del «MAIN LANDING GEAR DAMPER ASSEMBLY», P/N 237001/3, puntos «ASSEMBLY 2.A.(8)» y «TESTING AND TROUBLESHOOTING 1.C.(1)», de modo que se garantice la correcta anotación de resultados, incluyendo las unidades de los valores.

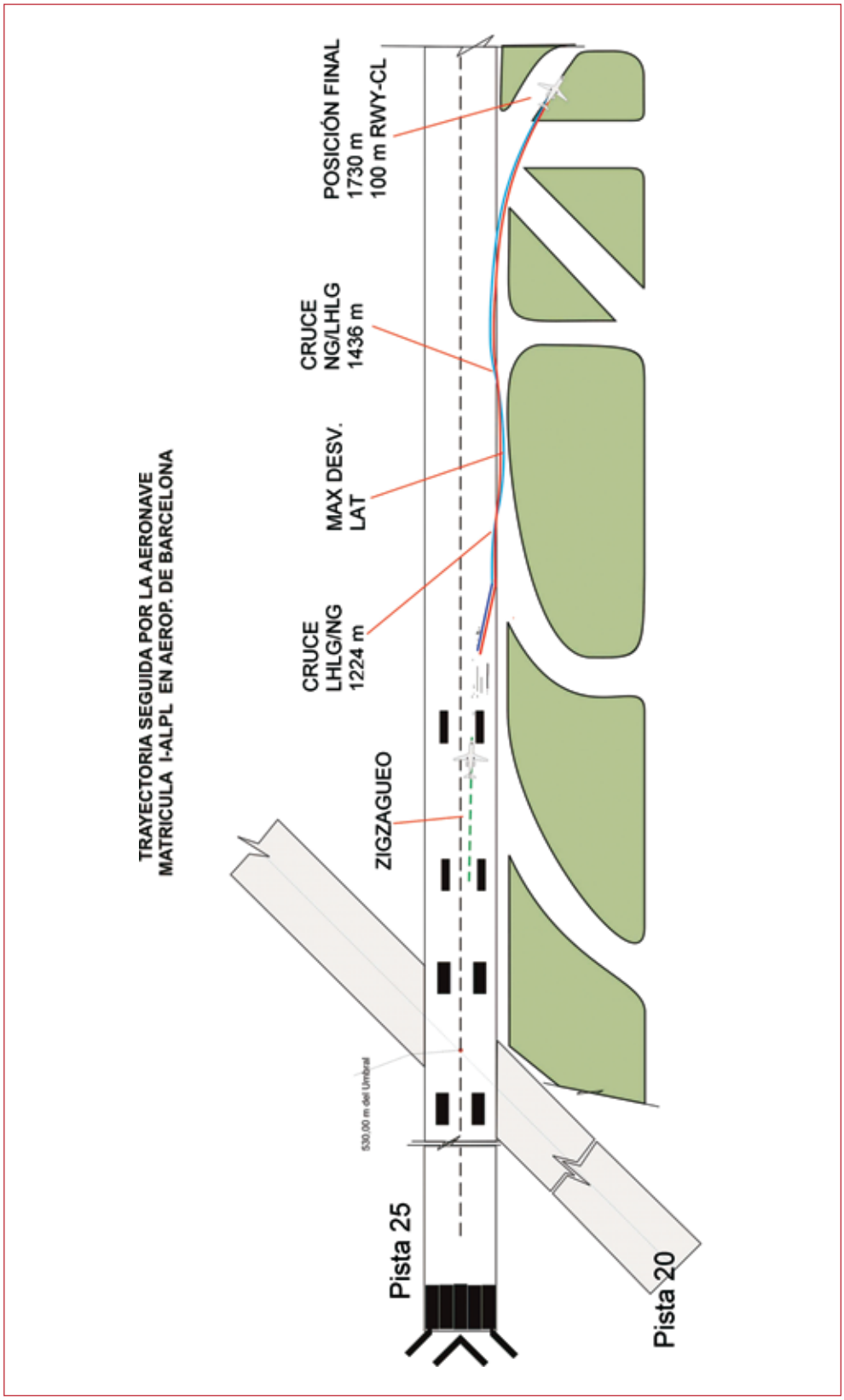
APÉNDICES

APÉNDICE A
Parámetros de DFDR

iempo	GMT	ALTC	RALC	CAS	GSPD	Espacio (metros)	MHDG		PITCH	ROLL	VERG	VERA	VERB	VERC	VERD	VERE	VERF	VERH	LATG	LATA	LATB	LATC	LONG	LONA	LONB	LONC	EPR1	EPR2	RD1	RD2	VHF	AIR
-62	13:54	576	684	142	133	-3737	253,4	2,1	1,1	0,987	0,976	0,999	1,033	1,042	1,049	1,07	1,065	0,04	0,001	0,005	0,021	0,015	0,04	0,056	0,05	1,17	1,17	0	0	0	1	
-61	13:54	576	672	140	133	-3668	253,4	1,8	0,6	1,012	0,974	0,971	0,969	0,983	0,996	0,985	0,987	0,017	0,011	0,005	0,029	0,038	0,038	0,046	0,042	1,19	1,19	0	0	0	1	
-60	13:54	512	668	140	133	-3600	253,4	1,5	0,2	0,967	0,939	0,935	0,944	0,946	0,953	0,957	0,971	0,017	-0,009	0,007	0,003	0,042	0,036	0,034	0,05	1,19	1,19	0	0	0	1	
-59	13:54	512	656	140	133	-3531	253,4	1,5	0,5	0,976	0,994	1,001	1,008	0,999	0,992	0,987	0,999	0,019	0,025	0,001	0,001	0,038	0,042	0,04	0,05	1,19	1,2	0	0	0	1	
-58	13:54	512	640	140	133	-3463	253,4	1,4	0,3	0,994	0,987	0,98	0,969	0,957	0,953	0,939	0,946	0,013	0,009	0,013	-0,003	0,044	0,04	0,027	0,04	1,19	1,2	0	0	0	1	
-57	13:54	512	628	138	133	-3395	253,3	1,4	0	0,941	0,937	0,951	0,967	0,932	0,93	0,944	0,955	-0,011	0,021	0,015	0,007	0,036	0,034	0,027	0,036	1,19	1,19	0	0	0	1	
-56	13:54	512	612	140	133	-3326	253,5	1,8	0,4	0,974	1,008	1,015	1,035	1,04	1,038	1,01	1,044	0,019	0,007	0,001	0,005	0,044	0,048	0,05	0,058	1,19	1,19	0	0	0	1	
-55	13:54	448	600	138	133	-3258	253,5	2,4	0,5	1,035	1,044	1,056	1,077	1,086	1,083	1,077	1,077	0,005	0,027	0,015	-0,007	0,052	0,052	0,052	0,062	1,19	1,2	0	0	0	1	
-54	13:54	448	580	138	133	-3189	253,6	2,5	0,6	1,06	1,026	0,992	0,992	0,967	0,98	0,974	0,994	-0,003	0,019	0,009	0,003	0,046	0,038	0,032	0,042	1,2	1,2	0	0	0	1	
-53	13:54	448	552	140	133	-3121	253,8	2,5	1,2	1,003	1,015	1,026	1,047	1,063	1,072	1,06	1,067	0,013	0,005	0,015	0,025	0,042	0,048	0,056	0,06	1,2	1,21	0	0	0	1	
-52	13:54	448	520	139	133	-3053	254,0	2,5	1,2	1,044	1,067	1,095	1,09	1,081	1,12	1,081	1,074	0,003	0,001	0,06	0,078	0,06	0,05	0,058	0,056	1,21	1,22	0	0	0	1	
-51	13:54	448	516	133	133	-2984	254,4	1,9	1,8	1,07	1,031	1,017	1,01	1,015	1,015	1,022	1,015	0,019	0,023	-0,001	0,042	0,048	0,036	0,044	0,046	1,21	1,22	0	0	0	1	
-50	13:54	448	524	138	134	-2915	254,0	1,1	1,4	1,019	0,994	0,96	0,928	0,912	0,912	0,905	0,882	0,001	0,001	0,013	0,019	0,046	0,029	0,038	0,027	1,21	1,22	0	0	0	1	
-49	13:54	384	524	139	134	-2846	253,8	0,5	-0,6	0,893	0,877	0,907	0,9	0,916	0,925	0,944	0,93	-0,005	-0,005	-0,003	0,025	0,036	0,032	0,034	0,019	1,2	1,2	0	0	0	1	
-48	13:54	384	520	140	134	-2778	254,0	0,6	-0,2	0,937	0,935	0,953	0,951	0,969	0,955	0,974	0,976	0,023	0,019	0,04	0,023	0,029	0,034	0,036	0,027	1,19	1,19	0	0	0	1	
-47	13:54	384	504	140	134	-2709	253,9	1	-0,2	0,994	1,006	0,999	0,987	0,987	0,974	0,99	0,948	0,009	0,036	-0,021	0,005	0,038	0,032	0,025	0,017	1,18	1,18	0	0	0	1	
-46	13:54	384	488	139	135	-2639	253,3	1,2	-0,2	0,937	0,916	0,903	0,964	1,047	1,06	1,072	1,024	0,009	-0,015	0,007	-0,003	0,021	0,021	0,04	0,032	1,18	1,18	0	0	0	1	
-45	13:54	384	476	140	135	-2570	253,3	1,8	1,5	1,022	1,058	1,095	1,083	1,093	1,109	1,131	1,095	0,042	0,021	0,034	0,04	0,036	0,046	0,054	0,048	1,18	1,18	0	0	0	1	
-44	13:54	320	464	139	135	-2501	253,6	1,8	1,3	1,09	1,081	1,067	1,049	1,044	1,031	1,04	0,999	0,04	0,027	0,003	0,009	0,052	0,046	0,052	0,034	1,17	1,18	0	0	0	1	
-43	13:54	320	456	142	135	-2431	253,4	1,2	0,3	1,012	1,001	1,006	0,992	0,996	1,012	0,992	0,953	0,001	0,005	0,013	0,011	0,044	0,044	0,04	0,025	1,17	1,17	0	0	0	1	
-42	13:54	320	448	139	135	-2362	253,2	0,8	-0,4	0,919	0,93	0,955	0,974	0,992	0,983	0,951	0,921	0,015	0,036	0,025	0,021	0,023	0,032	0,036	0,021	1,17	1,17	0	0	0	1	
-41	13:54	320	436	138	135	-2292	253,1	0,9	0,5	0,909	0,916	0,935	0,948	0,928	0,903	0,875	0,88	0,04	0,021	-0,023	0,013	0,029	0,034	0,029	0,017	1,17	1,18	0	0	0	1	
-40	13:54	320	424	137	135	-2223	252,8	1,4	0,8	0,907	0,939	0,978	1,015	1,047	1,047	1,063	1,038	0,011	-0,009	0,021	0,046	0,027	0,046	0,064	0,05	1,17	1,18	0	0	0	1	
-39	13:54	320	408	138	135	-2153	252,9	2,1	0,4	1,079	1,09	1,095	1,09	1,079	1,049	1,038	1,015	0,029	-0,011	-0,003	-0,001	0,068	0,066	0,066	0,054	1,18	1,18	0	0	0	1	
-38	13:54	256	400	140	136	-2084	252,6	1,8	0,5	1,028	0,978	0,957	0,96	0,983	1,031	1,047	1,033	0,023	0,013	0,013	-0,001	0,056	0,048	0,054	0,05	1,19	1,19	0	0	0	1	
-37	13:54	256	384	137	136	-2014	252,7	1,6	0,2	1,017	1,006	0,987	0,978	0,955	0,957	0,964	0,985	0,003	0,019	0,009	0,011	0,05	0,05	0,05	0,048	1,2	1,2	0	0	0	1	
-36	13:54	256	380	139	136	-1944	252,9	1,8	0,7	1,015	1,01	1,042	1,047	1,04	1,012	1,026	1,01	0,032	0,034	0,05	0,046	0,042	0,048	0,056	0,06	1,2	1,21	0	0	0	1	
-35	13:54	256	372	137	136	-1874	252,8	1,6	0,6	1,017	1,008	1,035	1,047	1,031	0,992	1,006	1,006	0,005	0,021	0,029	0,021	0,052	0,064	0,07	0,064	1,21	1,21	0	0	0	1	
-34	13:54	256	360	137	137	-1803	251,9	1,2	0,1	0,992	0,98	0,971	0,971	0,946	0,919	0,882	0,951	0,011	0,019	0,011	0,009	0,048	0,048	0,04	0,048	1,21	1,21	0	0	0	1	
-33	13:54	192	340	140	137	-1733	251,1	1,2	-2,1	0,992	0,999	0,969	0,971	0,967	0,955	0,953	0,983	-0,007	0,001	0,009	0,009	0,054	0,04	0,032	0,042	1,2	1,21	0	0	0	1	
-32	13:54	192	328	142	137	-1663	251,0	1,6	-1,1	0,96	0,957	0,98	0,994	1,035	1,088	1,095	1,159	0,009	0,013	0,021	0,044	0,034	0,038	0,04	0,07	1,2	1,2	0	0	0	1	
-31	13:54	192	320	139	138	-1592	251,2	1,8	0,3	1,131	1,086	1,031	1,04	1,031	1,015	1,026	1,026	0,044	0,015	0,015	0,003	0,056	0,046	0,034	0,04	1,2	1,2	0	0	0	1	
-30	13:54	192	304	142	138	-1521	251,0	1,4	-0,4	1,015	1,017	1,019	1,019	1,015	1,01	0,978	0,967	-0,003	0,015	0,007	0,017	0,034	0,034	0,021	0,027	1,19	1,19	0	0	0	1	
-29	13:54	192	288	143	138	-1450	251,0	0,9	-1	0,96	0,992	0,987	0,983	0,985	0,962	0,962	0,957	0,017	-0,003	-0,023	0,036	0,038	0,025	0,021	0,025	1,19	1,19	0	0	0	1	
-28	13:54	192	284	141	138	-1379	251,4	0,9	1,8	0,941	0,985	1,012	1,019	1,026	1,022	0,996	0,994	0,025	0,068	0,048	0,025	0,042	0,027	0,023	0,032	1,18	1,18	0	0	0	1	
-27	13:54	128	272	141	138	-1308	251,4	0,4	0,1	0,994	0,983	0,957	0,948	0,951	0,96	0,941	0,916	0,015	0,011	0,013	-0,011	0,019	0,017	0,013	0,019	1,17	1,17	0	0	0	1	
-26	13:54	128	260	139	138	-1237	251,0	0	-0,8	0,916	0,925	0,951	0,971	0,976	0,978	0,964	0,971	0,011	0,019	0,011	0,011	0,005	0,011	0,011	0,013	1,16	1,15	0	0	0	1	
-25	13:54	128	244	142	138	-1166	251,2	-0,1	-1,2	0,994	0,978	1,001	1,008	1,038	0,996	0,99	0,996	0,017	0,007	0,001	0,015	0,007	0,009	0,007	0,013	1,15	1,13	0	0	0	1	
-24	13:54	128	228	144	138	-1095	251,7	-0,2	1,7	1,008	1,003	1,022	1,003	0,999	0,976	0,96	0,944	0,038	0,048	0,048	0,003	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	1,13	1,11	0	0	0	1	
-23	13:54	64	212	143	138	-1024	251,9	0,2	0,4	0,919	0,907	0,905	0,912	0,946	0,985	0,99	1,028	-0,013	-0,003	0,042	0,048	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	1,11	1,09	0	0	0	1	
-22	13:54	64	200	144	138	-953	252,4	1,4	1,1	1,047	1,095	1,145	1,161	1,18	1,189	1,198	1,191	0,021	0,027	0,036	0,072	-0,01	0,001	0,009	0,015	1,1	1,08	0	0	0	1	
-21	13:54	64	184	141	137	-882	252,8	1,5	1,4	1,141	1,127	1,095	1,083	1,04	0,996	0,987	0,951	0,015	0,025	0,038	0,007	0,023	-0	-0,01	-0,01	1,09	1,08	0	0	0	1	
-20	13:54	64	172	142	137	-812	252,3	0,9	0,4	0,944	0,962	0,953	0,99	1,024	1,01	1,042	1,104	0,015	-0,005	0,034	0,027	-0,01	-0,02	-0,01	0,005	1,09	1,08	0	0	0	1	
-19	13:54	64	164	146	136	-741	252,1	1,1	0	1,095	1,113	1,136	1,159	1,152	1,049	0,974	1,008	0,066	0,062	0,025	-0,005	0,009	0,009	-0,02	-0,02	1,09	1,07	0	0	0	1	
-18	13:54	64	148	144	135	-672	251,5	0,7	2	1,003	1,006	0,987	0,944	0,957	0,944	0,941	0,944	0,017	0,076	0,064	0,052	-0,03	-0,03	-0,02	-0,03	1,09	1,07	0	0	0	1	
-17	13:54	0	144	147	135	-602	251,1	0,5	1,5	0,971	0,953	0,946	0,941	0,955	0,907	0,843	0,85	0,023	0,003	-0,011	-0,046	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	1,1	1,07	0	0	0	1	
-16	13:54	0	128	138	134	-533	250,0	0,6	2,6	0,861	0,834	0,854	0,854	0,852	0,88	0,916	0,919	-0,027	0,032	0,029	0,023	-0,04	-0,02	-0,02	-0,01	1,1	1,07	0	0	0	1	
-15	13:54	0	112	137	133	-464	250,2	1,2	-0,7	0,951	0,974	0,967	0,971	0,98	1,017	1,012	1,008	0,021	0,011	0,017	0,042	-0	-0,01	0,007	0,015	1,11	1,08	0	0	0	1	
-14	13:54	0	92	135	133	-396	250,6	1,8	1,3	1,028	1,038	1,056	1,054	1,072	1,111	1,077	1,067	0,056	0,052	0,036	0,038	0,023	0,023	0,042	0,036	1,13	1,12	0	0	0	1	
-13	13:54	-64	80	138	133	-328	249,9	2	1,3	1,079	1,079	1,083	1,09	1,109	1,077	1,051	1,035	0,009	0,013	0,019	-0,005	0,046	0,056	0,064	0,05	1,17	1,16	0	0	0	1	
-12	13:54	-64	68	137	133	-259	249,2	1,9	1,7	1,028	1,012	0,985	1,028	1,026	0,992	0,992	0,962	0,036	0,042	-0,007	-0,013	0,048	0,064	0,062	0,052	1,18	1,18	0	0	0	1	
-11	13:54	-64	56	135	133	-191	248,8	1,6	-0,3	0,996	1,008	0,978	0,978	0,941	0,928	0,969	0,996	-0,007	-0,027	-0,009	0,019	0,054	0,056	0,046	0,064	1,19	1,19	0	0	0	1	
-10	13:55	-64	40	135	133	-122	249,3	1,5	-0,1	1,04	0,994	0,98	0,953	0,946	0,932	0,939	0,967	0,054	0,001	0,025	0,025	0,052	0,052	0,048	0,06	1,19	1,19	0	0	0	1	
-12	13:54	-64	68	137	133	-259	249,2	1,9	1,7	1,028	1,012	0,985	1,028	1,026	0,992	0,992	0,962	0,036	0,042	-0,007	-0,013	0,048	0,064	0,062	0,052	1,18	1,18	0	0	0	1	
-11	13:54	-64	56	135	133	-191	248,8	1,6	-0,3	0,996	1,008	0,978	0,978	0,941	0,928	0,969	0,996	-0,007	-0,027	-0,009	0,019	0,054	0,056	0,046	0,064	1,19	1,19	0	0	0	1	

tpo	GMT	ALTC	RALC	CAS	GSPD	Espacio (metros)	MHDG		PITCH	ROLL	VERG	VERA	VERB	VERC	VERD	VERE	VERF	VERH	LATG	LATA	LATB	LATC	LONG	LONA	LONB	LONC	EPR1	EPR2	RD1	RD2	VHF	AIR
-10	13:55	-64	40	135	133	-122	249,3	1,5	-0,1	1,04	0,994	0,98	0,953	0,946	0,932	0,939	0,967	0,054	0,001	0,025	0,025	0,052	0,052	0,048	0,06	1,19	1,19	0	0	0	1	
-9	13:55	-64	24	135	134	-54 Thrshld	249,6	1,8	-0,6	0,98	0,99	1,012	1,031	1,035	1,047	1,063	1,106	0,023	0,025	0,021	0,032	0,058	0,062	0,06	0,082	1,19	1,19	0	0	0	1	
-8	13:55	-128	16	134	134	15 Thrshld	249,2	2,5	-0,8	1,074	1,088	1,095	1,111	1,097	1,111	1,093	1,109	0,032	0,034	0,019	0,038	0,066	0,068	0,066	0,076	1,18	1,17	0	0	0	1	
-7	13:55	-128	4	134	134	84	248,9	3,5	-1	1,088	1,074	1,083	1,104	1,106	1,111	1,109	1,145	0,023	0,015	0,021	0,029	0,07	0,062	0,066	0,091	1,17	1,16	0	0	0	1	
-6	13:55	-128	0	135	134	153 Max pitch	248,5	4,9	-1,4	1,163	1,202	1,225	1,228	1,198	1,157	1,145	1,113	0,017	0,013	0,017	0,029	0,084	0,074	0,062	0,064	1,14	1,13	0	0	0	1	
-5	13:55	-128	0	130	134	222 flare	248,6	4,7	-0,4	1,088	1,111	1,074	1,067	1,06	1,038	1,017	1,008	0,017	0,003	0,017	0,015	0,06	0,042	0,042	0,029	1,11	1,1	0	0	0	1	
-4	13:55	-128	0	133	133	291	249,2	3,7	0,4	1,003	0,996	0,996	0,976	0,967	0,978	0,978	0,962	0,013	0,017	0,048	0,064	0,027	0,017	0,013	0,013	1,08	1,08	0	0	0	1	
-3	13:55	-128	0	133	132	359	249,9	2,9	2,1	0,962	0,967	0,941	0,953	0,953	0,935	0,953	0,994	0,062	0,054	0,068	0,05	0,007	0,009	0,001	0,009	1,07	1,07	0	0	0	1	
-2	13:55	-128	0	133	131	427	249,5	3	1,7	0,962	0,967	0,969	0,983	0,98	1,008	1,003	1,019	0,027	0,032	0,044	0,027	-0	0,011	0,007	0,023	1,07	1,07	0	0	0	1	
-1	13:55	-128	0	132	130	494	248,5	4,1	1	1,022	1,028	1,042	1,056	1,191	1,248	1,058	0,999	0,019	0,027	0,046	0,011	0,029	0,032	-0	0,001	1,07	1,07	0	0	0	1	
0	13:55	-128	-4	130	128	560 ground	247,8	3,4	-0,4	0,983	0,941	0,889	0,802	0,754	0,857	1,006	1,01	0,029	0,034	-0,093	-0,084	0,007	-0,02	-0,05	-0,12	1,07	1,06	0	0	0	0	
1	13:55	-128	-4	124	126	625	247,3	2	1,7	1,244	1,317	1,312	1,109	0,937	0,843	0,841	0,88	-0,068	-0,023	-0,095	-0,074	-0,03	-0,06	-0,08	-0,11	1,07	1,07	0	0	0	0	
2	13:55	-128	-4	121	124	690 revers	247,4	1,3	1,2	0,994	1,07	1,166	1,163	1,102	1,01	0,962	0,914	-0,025	-0,04	-0,066	0,038	-0,13	-0,17	-0,15	-0,17	1,08	1,07	1	1	0	0	
3	13:55	-128	-4	120	120	753 shimmy	247,9	0,7	1,1	1,003	0,96	1,019	1,083	1,07	1,035	1,022	0,944	-0,064	-0,082	-0,04	0,097	-0,18	-0,19	-0,18	-0,21	1,08	1,07	1	1	0	0	
4	13:55	-128	-4	117	117	814 shimmy	248,4	-0,2	1,1	1,111	0,951	1,033	0,935	1,031	1,058	1,09	1,035	-0,015	-0,129	-0,111	0,123	-0,21	-0,2	-0,19	-0,22	1,08	1,07	1	1	0	0	
5	13:55	-128	-4	113	113	873 shimmy	248,6	0,3	1,1	1,028	0,916	0,974	0,992	0,877	0,74	0,697	0,877	0,007	-0,127	-0,072	-0,015	-0,22	-0,21	-0,21	-0,14	1,08	1,07	1	1	0	0	
6	13:55	-128	-4	108	110	930 wing dwn	249,1	2,8	11,8	0,957	0,852	1,475	1,516	1,651	1,218	0,735	0,603	-0,125	0,172	-0,213	0,056	-0,12	-0,22	-0,15	-0,09	1,07	1,04	1	1	0	0	
7	13:55	-128	-4	107	106	986	251,2	1,4	11,2	0,598	1,113	0,953	1,115	1,15	1,196	1,015	1,095	-0,182	-0,172	0,164	-0,038	-0,1	-0,05	-0,03	-0,1	1,06	1,05	1	1	0	0	
8	13:55	-128	-4	106	103	1039	254,4	1,9	11,5	0,932	0,909	0,962	1,042	1,056	1,012	0,971	0,992	0,066	-0,013	-0,009	-0,08	-0,09	-0,07	-0,05	-0,08	1,05	1,05	1	1	0	0	
9	13:55	-128	-4	103	100	1092	254,9	1,9	12	0,992	1,051	1,06	1,022	0,985	0,99	0,978	0,962	-0,027	-0,093	-0,127	-0,164	-0,33	-0,31	-0,3	-0,28	1,05	1,04	1	1	0	0	
10	13:55	-128	-4	94	94	1141	249,2	1,8	11,8	0,946	0,999	1,106	1,12	0,962	0,813	0,774	0,852	-0,158	-0,381	-0,388	-0,388	-0,3	-0,34	-0,35	-0,19	1,04	1,04	1	1	0	0	
11	13:55	-64	-4	93	87	1188	239,3	1,8	11,5	0,912	0,994	1,047	1,042	0,99	0,925	0,877	0,884	-0,477	-0,493	-0,491	-0,459	-0,1	-0,12	-0,15	-0,15	1,04	1,04	1	1	0	0	
12	13:55	-64	-4	89	82	1232	233,4	1,7	12,1	0,871	0,866	0,962	0,96	1,001	0,967	0,875	0,905	-0,457	-0,451	-0,475	-0,41	-0,12	-0,12	-0,16	-0,14	1,04	1,04	1	1	0	0	
13	13:55	-128	-4	72	78	1273 LH yaw	232,1	1,8	12,5	0,916	0,9	0,994	0,999	1,008	0,985	0,971	0,93	-0,43	-0,432	-0,388	-0,318	-0,11	-0,14	-0,24	-0,24	1,04	1,03	1	1	0	0	
14	13:55	-128	-4	78	74	1312	234,9	1,7	12,7	0,937	0,971	0,951	0,951	0,967	0,99	0,99	0,994	-0,386	-0,192	-0,302	-0,18	-0,23	-0,27	-0,12	-0,12	1,04	1,03	1	1	0	0	
15	13:55	-128	-4	73	69	1349	239,1	1,7	12,9	1,001	0,985	0,992	0,99	0,996	0,967	0,96	0,999	-0,219	-0,166	-0,115	-0,113	-0,1	-0,15	-0,11	-0,1	1,04	1,03	1	1	0	0	
16	13:55	-128	-4	68	66	1383	244,9	1,6	12,7	1,012	1,024	1,088	1,07	0,969	0,994	0,962	1,028	-0,062	-0,074	-0,152	0,017	-0,14	-0,11	-0,12	-0,1	1,04	1,03	1	1	0	0	
17	13:55	-128	-4	67	63	1416	250,3	1,3	11,6	1,159	1,09	1,012	0,971	0,919	0,957	0,985	1,111	-0,036	-0,066	-0,046	-0,034	-0,11	-0,13	-0,12	-0,1	1,04	1,03	1	1	0	0	
18	13:55	-128	-4	63	61	1448	253,0	1,2	11,2	1,099	0,971	0,912	0,96	1,012	0,992	1,022	1,102	-0,038	-0,107	-0,005	-0,137	-0,14	-0,11	-0,14	-0,13	1,04	1,03	1	1	0	0	
19	13:55	-128	-4	61	58	1479	253,5	1,2	11,8	0,994	1,024	0,976	1,024	1,118	1,051	0,96	0,994	0,005	-0,099	-0,139	-0,04	-0,13	-0,08	-0,13	-0,14	1,04	1,03	1	1	0	0	
20	13:55	-128	-4	56	55	1508	252,3	1,1	11,9	1,067	1,06	0,939	0,903	0,967	1,056	0,983	0,946	-0,204	-0,05	-0,237	-0,141	-0,15	-0,12	-0,1	-0,14	1,04	1,03	1	1	0	0	
21	13:55	-128	-4	57	52	1536	249,8	1,4	11,5	1,07	1,077	1,001	0,937	0,937	0,946	0,985	1,072	-0,272	-0,176	-0,268	-0,213	-0,16	-0,16	-0,12	-0,15	1,05	1,04	1	1	0	0	
22	13:55	-128	-4	51	49	1562	246,7	1,6	11,2	1,044	1,024	0,948	0,919	0,941	1,056	1,047	0,971	-0,223	-0,237	-0,237	-0,2	-0,19	-0,15	-0,15	-0,16	1,06	1,05	1	1	0	0	
23	13:55	-128	-4	49	45	1586	246,3	1,4	11,3	0,905	1,022	1,047	1,019	1,003	0,98	0,903	1,04	-0,227	-0,148	-0,192	-0,117	-0,2	-0,2	-0,15	-0,13	1,08	1,06	1	1	0	0	
24	13:55	-128	-4	41	42	1608	250,4	1,8	10,8	1,12	1,063	0,941	0,914	0,996	1,06	1,086	0,976	-0,111	-0,054	-0,034	-0,032	-0,26	-0,21	-0,18	-0,15	1,11	1,09	1	1	0	0	
25	13:55	-128	-4	38	37	1628	257,6	2	10,5	0,887	0,914	1,033	1,12	1,159	1,102	0,941	0,884	-0,015	0,017	-0,021	-0,001	-0,1	-0,14	-0,23	-0,15	1,15	1,13	1	1	0	0	
26	13:55	-128	-4	34	33	1646 Max EPR	264,4	1	10,9	0,912	0,948	0,971	1,028	1,131	1,051	0,969	0,967	0,04	0,005	0,017	-0,003	-0,1	-0,13	-0,16	-0,13	1,18	1,13	1	1	0	0	
27	13:55	-128	-4	33	30	1663	270,2	1,9	10,4	1,038	1,104	1,086	0,971	1,01	1,134	1,086	1,031	0,011	-0,007	-0,062	0,019	-0,13	-0,16	-0,14	-0,17	1,17	1,13	1	1	0	0	
28	13:55	-128	-4	0	27	1677	274,8	1,6	10,6	1,044	0,974	0,983	0,983	1,06	1,051	0,928	1,001	-0,089	0,023	-0,056	-0,032	-0,17	-0,15	-0,08	-0,16	1,17	1,16	1	1	0	0	
29	13:55	-128	-4	0	23	1690	279,0	1,1	10,4	1,063	1,017	0,974	0,971	1,022	1,006	0,969	1,003	-0,042	-0,048	-0,064	-0,05	-0,18	-0,11	-0,16	-0,17	1,16	1,14	1	1	0	0	
30	13:55	-128	-4	384	20	1701	282,6	1,1	10,2	0,971	0,948	0,969	1,022	1,065	0,967	0,983	0,999	-0,064	-0,105	-0,093	-0,109	-0,16	-0,15	-0,16	-0,15	1,11	1,1	1	1	0	0	
31	13:55	-128	-4	384	16	1710 No revers	284,9	1,1	10,4	1,026	0,994	0,957	0,974	0,946	0,964	0,98	0,978	-0,095	-0,107	-0,103	-0,154	-0,19	-0,13	-0,16	-0,17	1,08	1,08	1	1	0	0	
32	13:55	-128	-4	384	12	1718 RH yaw	285,9	1,1	10,6	1,012	1,006	0,976	0,983	0,999	1,003	0,978	0,96	-0,113	-0,174	-0,117	-0,19	-0,17	-0,15	-0,15	-0,14	1,07	1,07	0	0	0	0	
33	13:55	-128	-4	384	9	1723	286,4	1,1	10,9	0,967	0,987	0,996	1,042	1,022	0,964	0,909	0,941	-0,129	-0,164	-0,18	-0,16	-0,14	-0,14	-0,14	-0,1	1,06	1,06	0	0	0	0	
34	13:55	-128	-4	0	6	1727	286,4	0,9	10,7	1,012	1,024	0,985	0,957	0,946	0,985	1,012	1,01	-0,162	-0,176	-0,188	-0,166	-0,12	-0,14	-0,13	-0,14	1,05	1,05	0	0	0	0	
35	13:55	-128	-4	0	3	1729	285,4	0,8	10,5	0,953	0,953	0,992	1,006	1,008	0,976	0,964	0,996	-0,198	-0,164	-0,196	-0,172	-0,13	-0,15	-0,17	-0,18	1,05	1,05	0	0	1	0	
36	13:55	-128	7564	0	0	1730 Halt	284,4	0,7	10,5	0,992	0,996	0,992	1,008	0,992	0,795	1,729	0,822	-0,2	-0,158	0,512	-1,055	-0,23	-0,17	0,05	-1,08	1,04	0	1	1	0	0	

APÉNDICE B
Croquis del Aeropuerto de Barcelona



Croquis B.1. *Trayectoria y huellas de las ruedas en la carrera de aterrizaje*

APÉNDICE C

Dibujo del tren y croquis de las líneas de grietas y fracturas en el cilindro superior

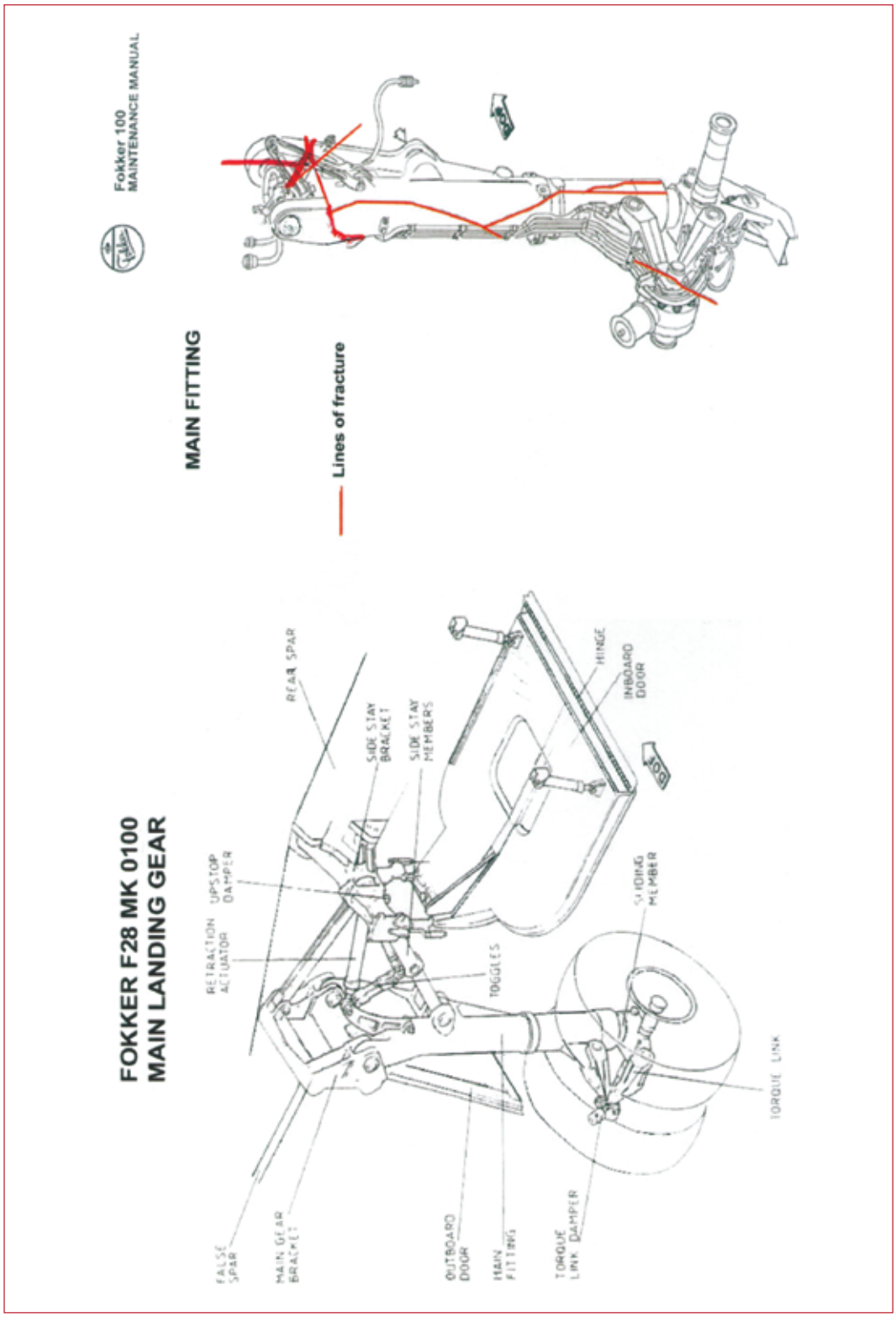


Figura C.1. *Pata izquierda de tren principal. La pata derecha monta la riostra en el lado izquierdo de la pata. Se marcan en rojo las líneas de fractura del cilindro superior*

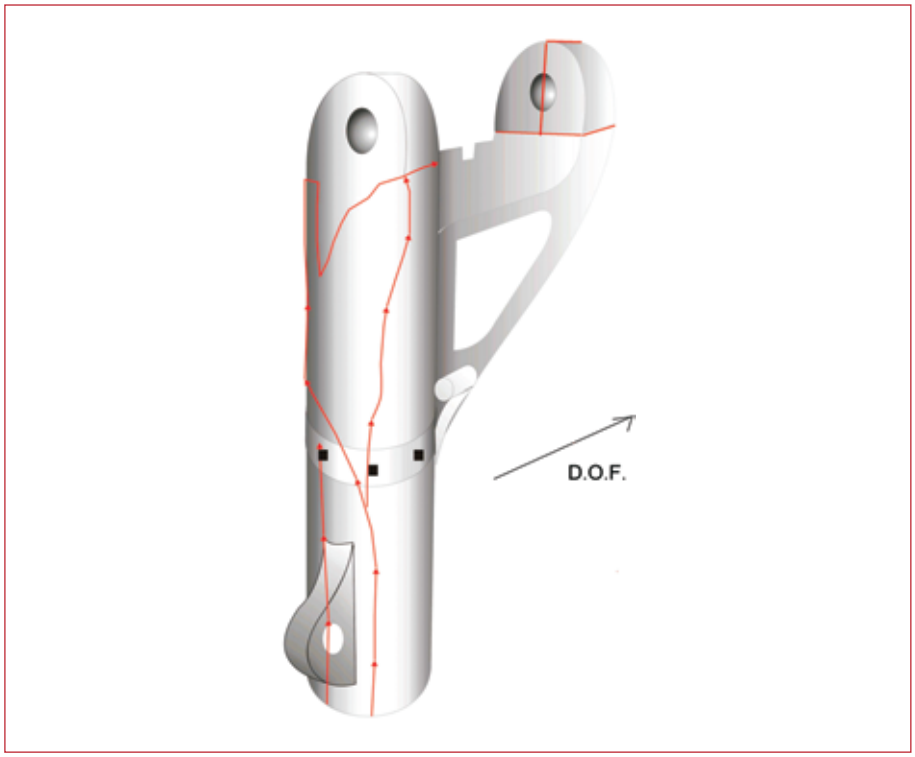


Figura C.2. *Líneas de crecimiento de las grietas en el colapso del cilindro superior derecho*

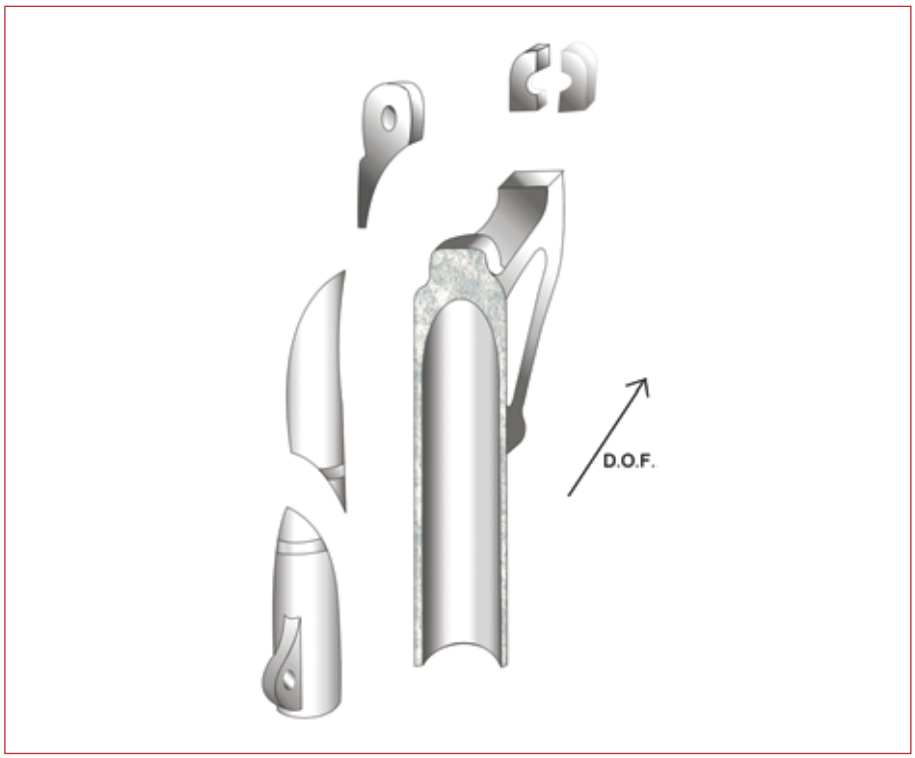


Figura C.3. *Fragmentos principales del cilindro superior derecho*

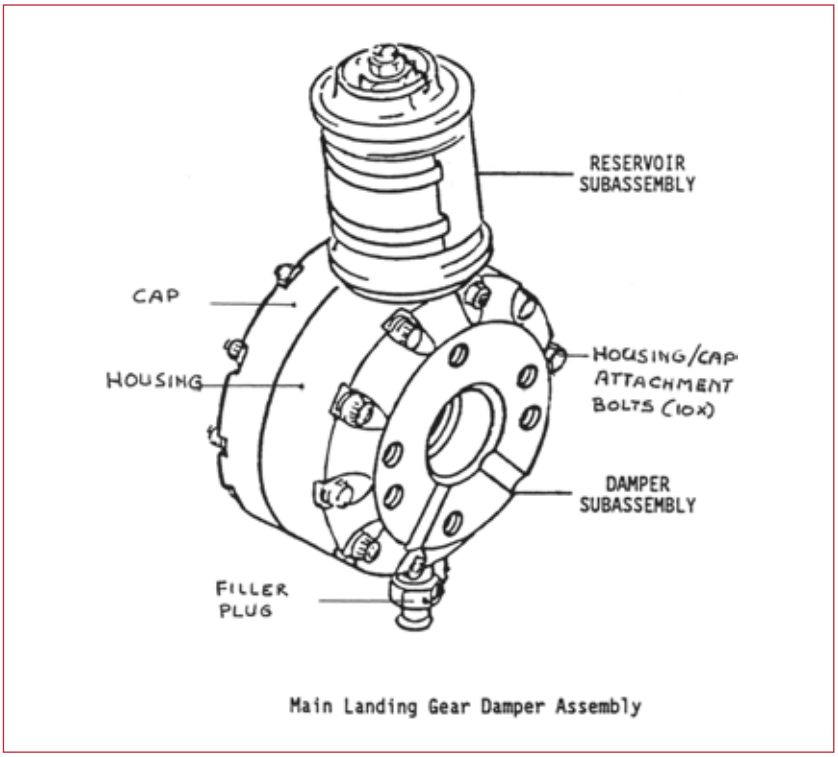


Figura C.4. *Amortiguador de zigzagueo*

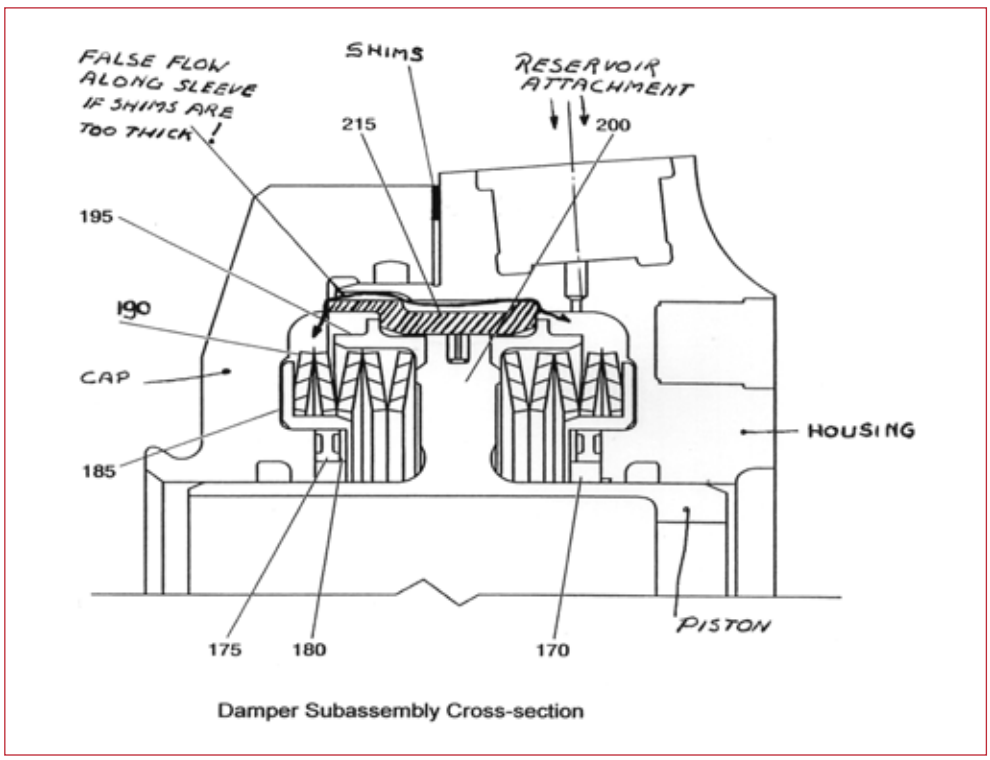


Figura C.5. *Sección del amortiguador (observar el paquete de anillos de relleno y vía del falso flujo interior en el amortiguador)*

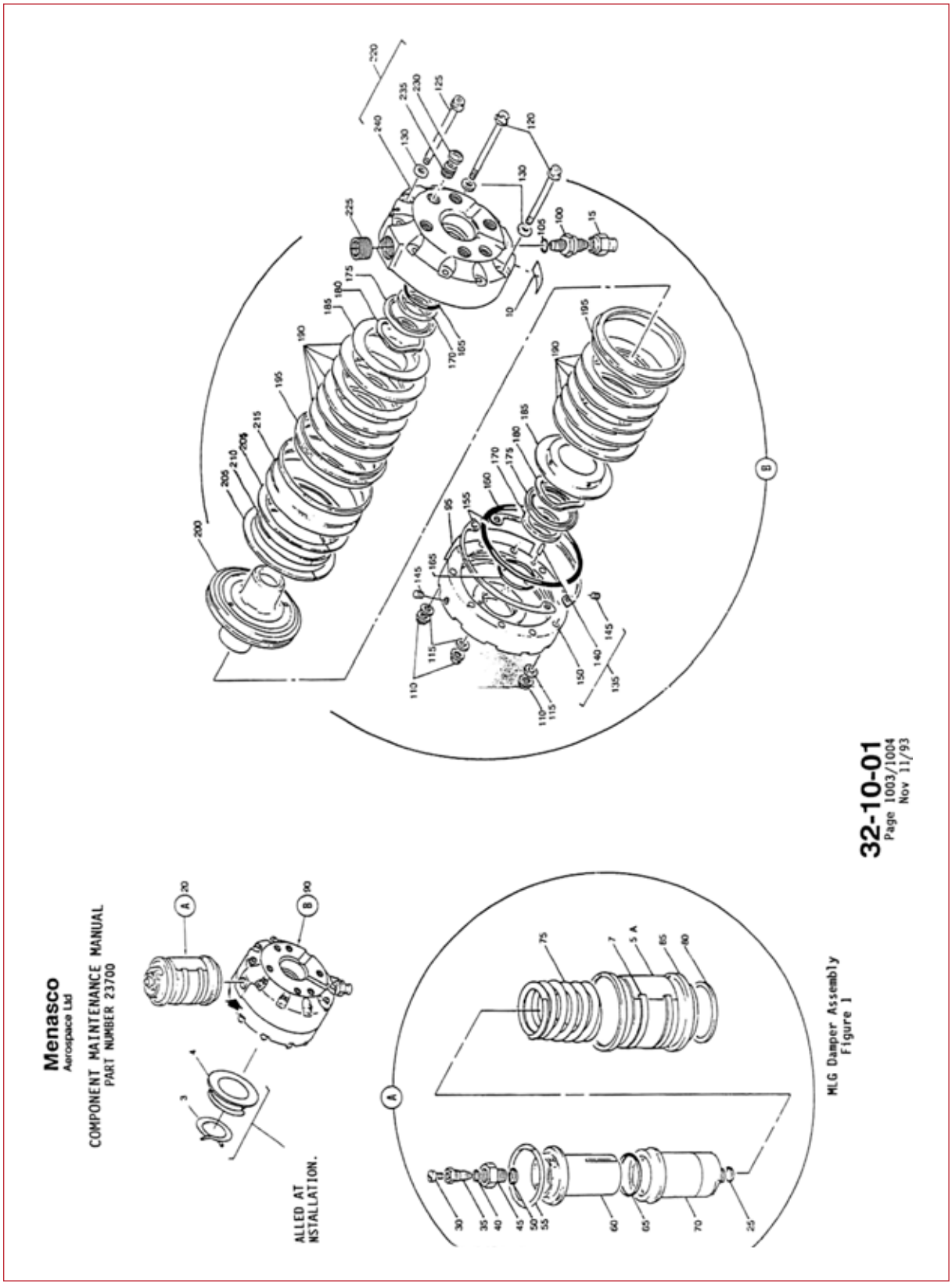


Figura C.6. *Despiece del amortiguador de zigzagueo*

APÉNDICE D

Capacidad de amortiguación de zigzagueo en distintas condiciones

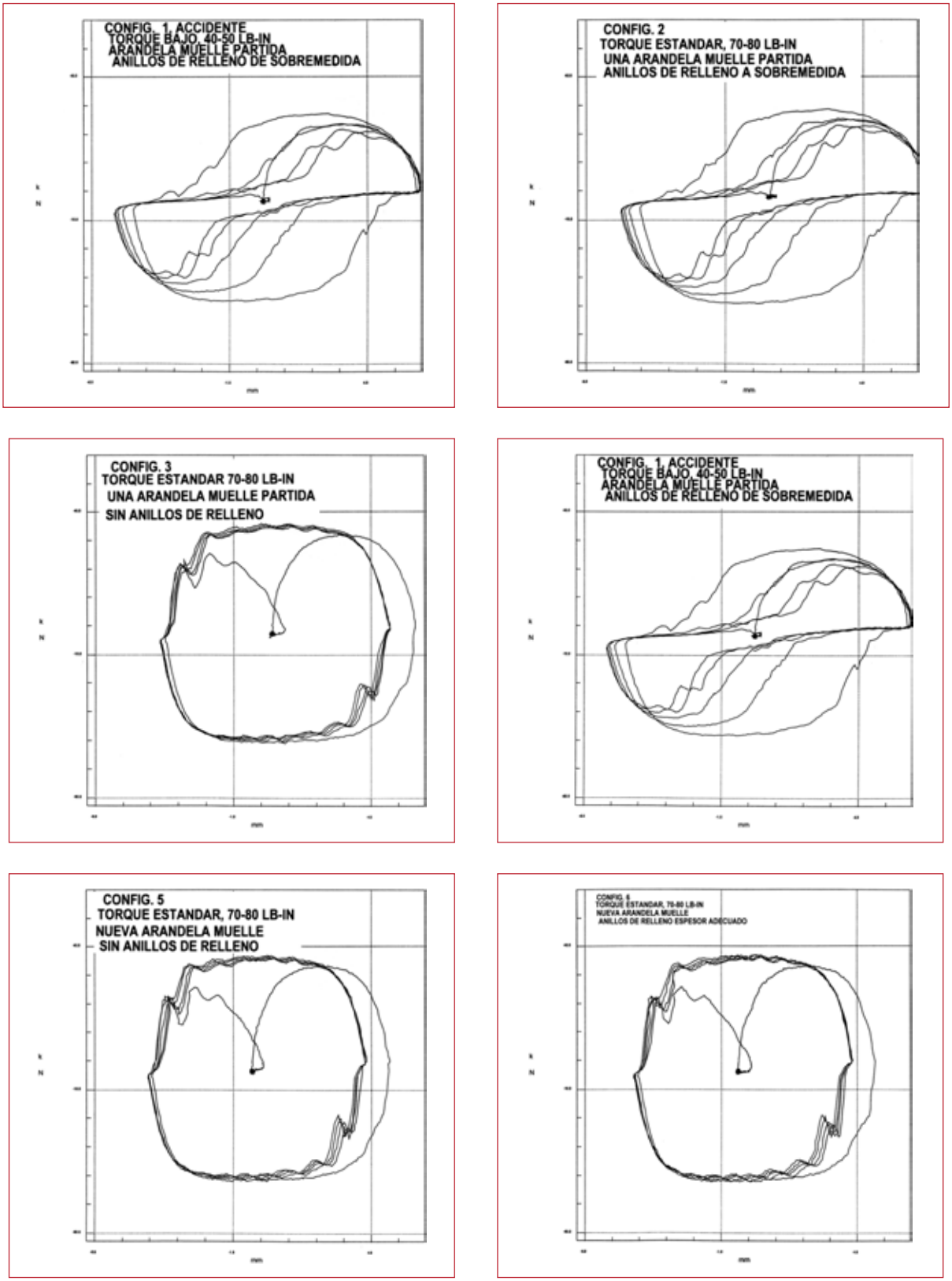


Figura D.1. *Comparación de los resultados de las pruebas de excitación dinámica a la frecuencia de 20 Hz del amortiguador de zigzagueo S/N: MAL176*