

Contribución del Consejo de Seguridad Nuclear en el Proyecto STORM

CSN

Colección
Otros Documentos
13.1999

Contribución del Consejo de Seguridad Nuclear en el Proyecto STORM

Alfredo de los Reyes Castelo

Colección
Otros Documentos CSN
Referencia: ODB-03.03

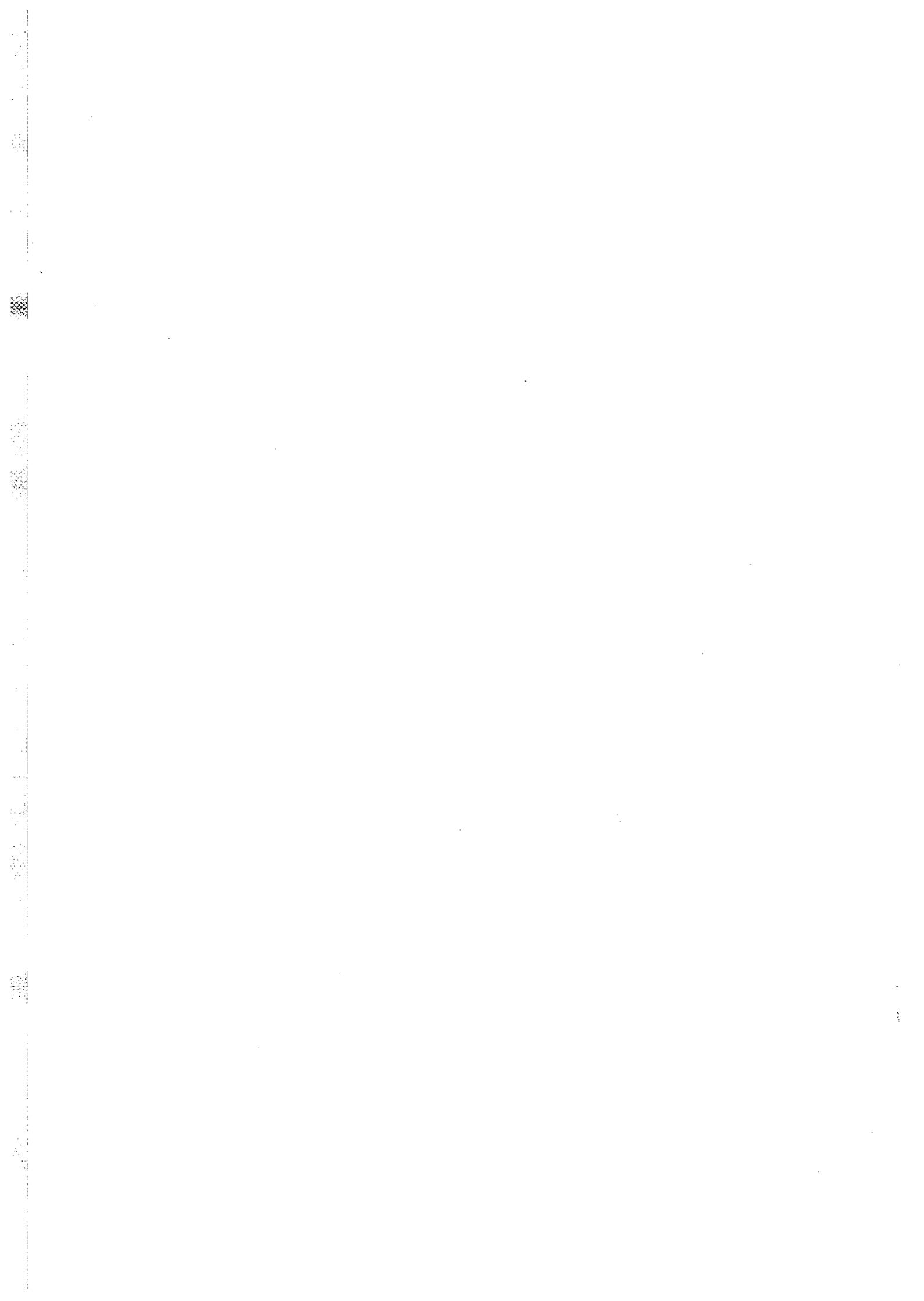
© Copyright 1999. Consejo de Seguridad Nuclear

Publicado y distribuido por:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 - Madrid
<http://www.csn.es>
Peticones@csn.es

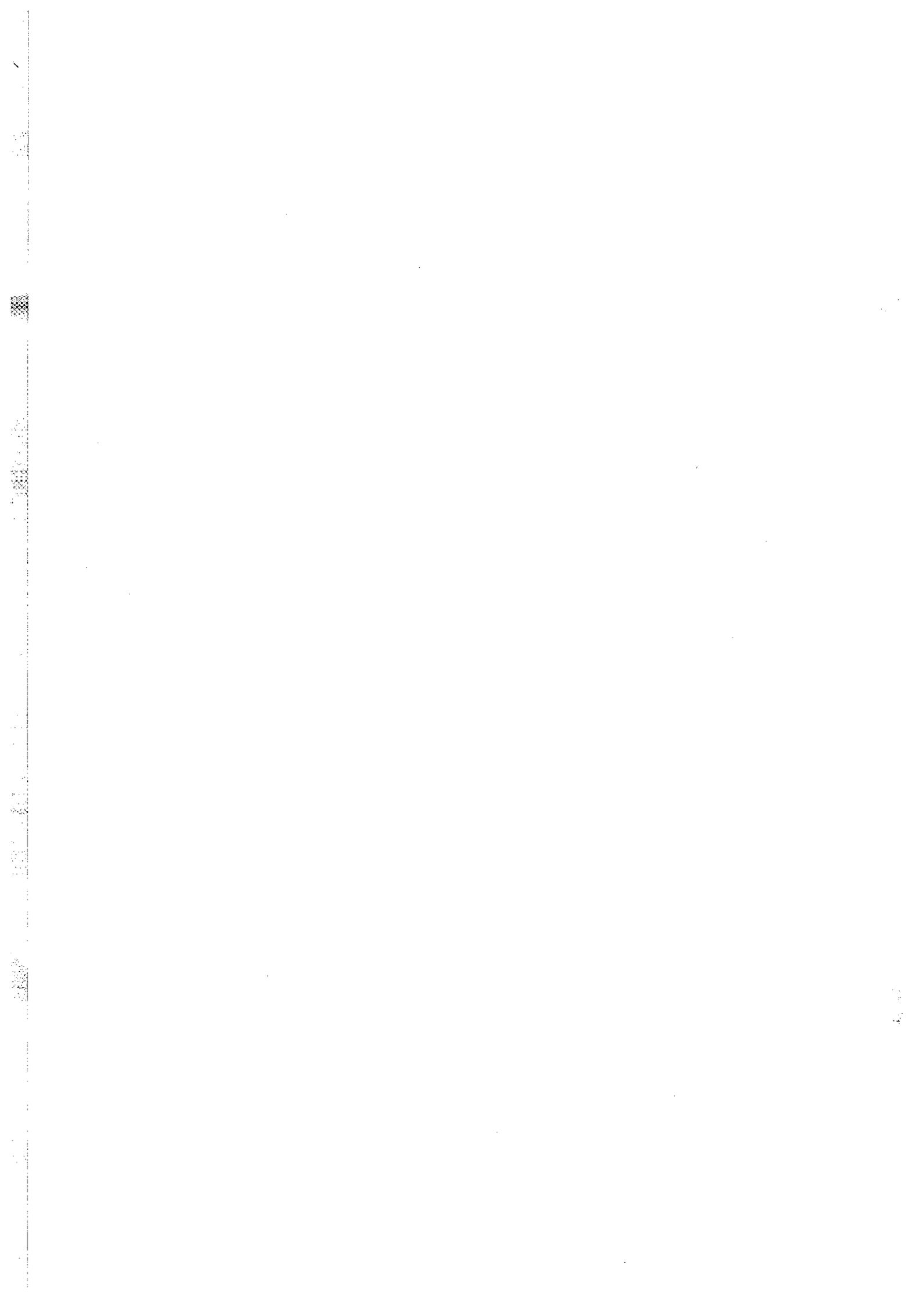
Imprime: Artegraf, S.A.
ISBN: 84-87275-98-2
Depósito Legal: M. 15.021-1999

Índice

Introducción	5
I. Proyecto STORM	9
II. Mejora del código de cálculo CAESAR	15
II.1. Estado del arte	17
II.2. Mejora del modelo de la turbulencia en la subcapa viscosa	19
II.3. Mejora del modelo de las fuerzas adhesivas	21
II.4. Resultados	25
III. Coordinación del ISP-40	27
III.1. ISP-40: Resultados del ejercicio de deposición	31
III.2. ISP-40: Resultados del ejercicio de resuspensión	33
III.3. Conclusiones específicas del ISP-40	35
IV. Análisis post-test de los aerosoles recogidos en los experimentos STORM	37
IV.1. Análisis de las partículas con el microscopio óptico ..	40
IV.2. Análisis químico de las partículas con el XRF	40
V. Conclusiones	43
Publicaciones y participaciones en conferencias	47



Introducción

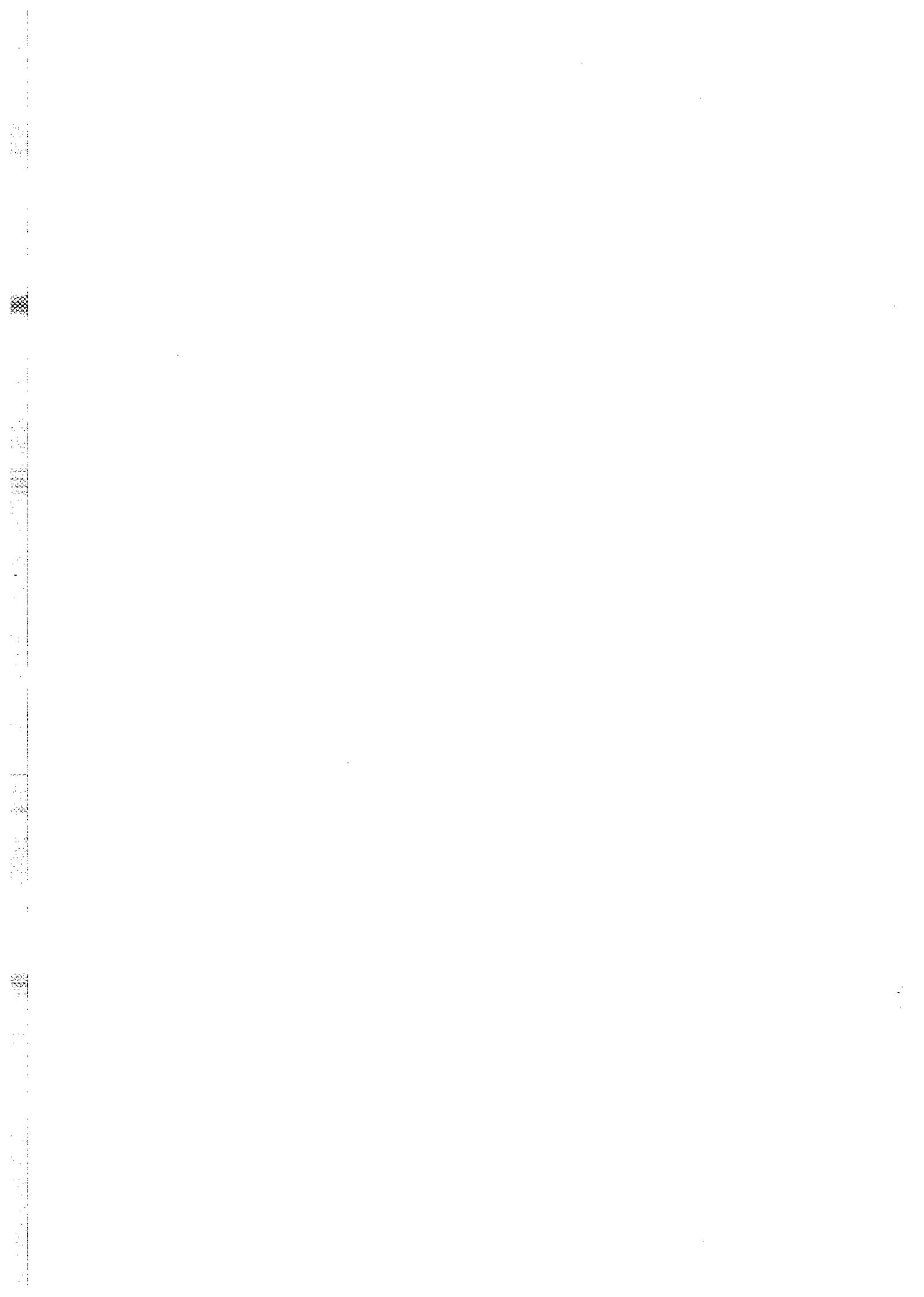


Introducción

El proyecto STORM (*Simplified Test on Resuspension Mechanisms*) forma parte de los proyectos de investigación del IV Programa Marco (1994 - 1998) de la Comisión de las Comunidades Europeas. Concretamente, este proyecto está incluido en el programa de Seguridad Nuclear, gestionado por el Instituto de Sistemas Informáticos y Seguridad (*Institute for Systems, Informatics and Safety*, ISIS), en el Centro Común de Investigación (CCI) de las Comunidades Europeas de Ispra (Italia).

En mayo de 1996, el Consejo de Seguridad Nuclear determinó participar activamente en el proyecto STORM mediante la asignación de una beca de dos años para la realización de estudios y trabajos experimentales sobre la formación, deposición y resuspensión de aerosoles dentro de dicho proyecto (septiembre 1996 - septiembre 1998). Las actividades a llevar a cabo consistirían en la mejora del código de cálculo CÆSAR, desarrollado como soporte analítico del proyecto STORM, la coordinación del Ejercicio Estándar Internacional, convocado por la OCDE y basado en un experimento STORM (ISP-40) y el análisis post-test de los aerosoles recogidos en los experimentos.

El presente informe recoge el trabajo llevado a cabo por Alfredo de los Reyes, becario del CSN, durante los veinticuatro meses de su permanencia en el CCI-Ispra y coordinado en el CSN por Manuel Malavé.



I. Proyecto STORM

I. Proyecto STORM

A la hora de evaluar las consecuencias de un accidente severo en una central nuclear, se deben considerar todos los procesos significativos que determinan la cuantía del escape radiactivo a la atmósfera (término fuente). Los aerosoles radiactivos, generados durante las primeras secuencias del accidente, son primordiales para determinar este término fuente, ya que son ellos los que transportan la mayor parte de los radionucleidos que abandonan el combustible. La retención de estas partículas en el sistema de refrigeración del reactor y en el edificio de contención de una central de agua ligera, en el transcurso de un accidente, es el resultado de dos fenómenos que se sobreponen: la deposición y la resuspensión.

La comunidad científica internacional estima que los mecanismos de deposición más relevantes, en los escenarios accidentales, se conocen suficientemente bien. El nivel de detalle de los modelos de deposición, incluidos en los códigos de cálculo para el análisis del transporte y retención de los aerosoles nucleares, es así mismo satisfactorio, en relación con el grado de precisión que se desea alcanzar en la evaluación del término fuente radiactivo, en los análisis de seguridad de los reactores de agua ligera (*Light Water Reactor*, LWR). Por el contrario, la resuspensión de aerosoles es un fenómeno aún no bien comprendido, y para su caracterización se precisan resultados experimentales adicionales a los obtenidos hasta la fecha.

En algunos de los experimentos que sirvieron para la validación de los modelos de deposición de aerosoles, como los de las series de MARVIKEN y LACE, se observó la resuspensión mecánica de partículas, asociada al paso de un flujo de gas turbulento, a muy alta velocidad, sobre los aerosoles depositados en tuberías y estructuras. Posteriormente, se estudió de forma aislada el fenómeno de la resuspensión, separado del resto de los mecanismos que afectan al transporte y deposición de los aerosoles, en las series experimentales ART-2 y PARESS. Sin embargo, en estos experimentos a pequeña escala, no se simulaban con rigor las condiciones reales, que se esperan en los escenarios accidentales de una central nuclear.

El proyecto STORM nace como resultado de un contrato de colaboración entre el CCI-Ispra y la ENEL S.p.A. (Compañía Eléctrica Italiana), firmado en diciembre de 1991. En la actualidad se trata de un programa de investigación internacional, abierto a la colaboración entre organizaciones internas o externas a la Unión Europea, interesadas en mejorar el conocimiento sobre los accidentes severos en los reactores nucleares de la presente generación y generaciones futuras, en lo que se refiere al transporte y comportamiento de los productos de fisión y de los aerosoles radiactivos.

Con este fin, el proyecto STORM emplea una instalación experimental a gran escala (figura 1), situada en el CCI-Ispra, para estudio ex profeso del transporte de los aerosoles en el circuito de refrigeración del reactor. Los parámetros físicos que caracterizan el fluido (velocidad, temperatura, presión y composición), la geometría de los componentes y las características de los depósitos de aerosoles (espesor, composición y morfología) son representativos de las condiciones accidentales reales en una central nuclear. Un elevado número de mediciones, tradicionales y avanzadas, permite la caracterización de los mecanismos de deposición y resuspensión de estas partículas, de forma exhaustiva. Es más, tratándose de experimentos de efectos separados (en una primera fase se produce la deposición y más adelante la resuspensión), los datos recogidos pueden ser diferenciados para el estudio de cada proceso.

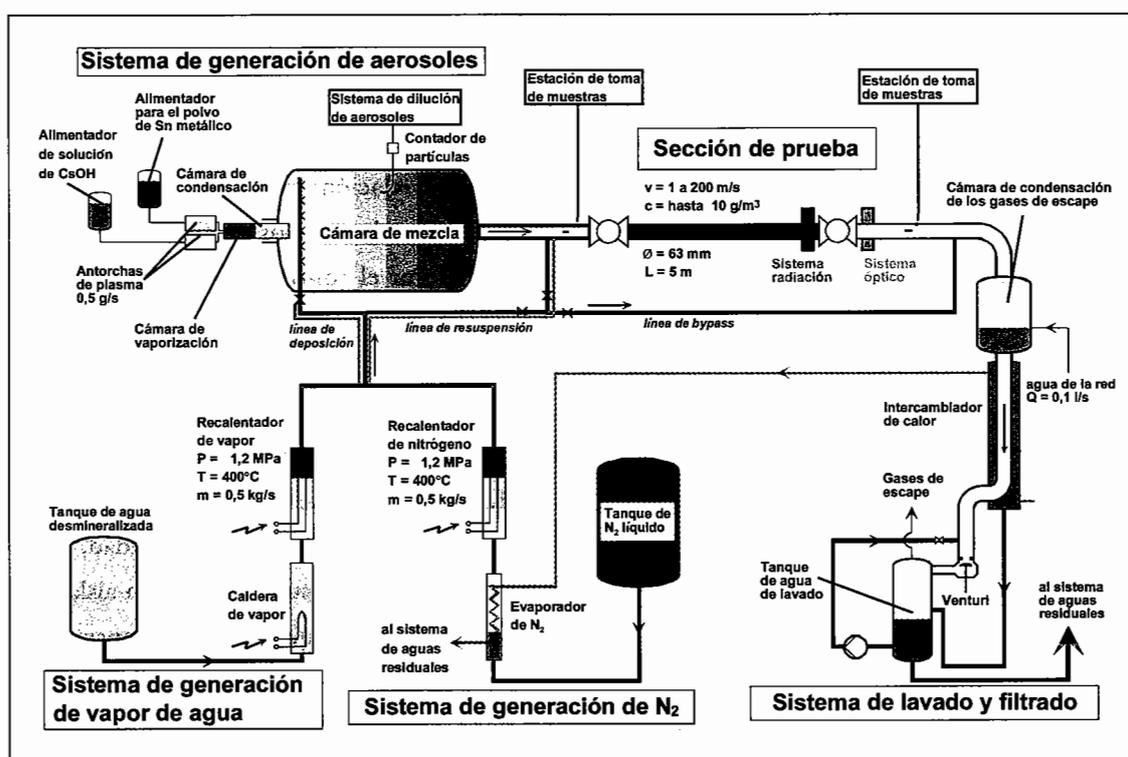


Figura 1. Instalación STORM.

El objetivo fundamental del proyecto STORM es el de aportar datos experimentales para la validación y desarrollo de modelos teóricos o semiempíricos, que serán incluidos en códigos de cálculo, para la evaluación del término fuente.

Hasta la fecha, se han realizado 14 experimentos oficiales (tabla 1). En la primera serie de experimentos, se estudiaron sólo los mecanismos de deposición de aerosoles en una tubería recta

de 63 milímetros de diámetro interior. Con sus resultados se pudieron valorar los datos de partida para la fase de resuspensión. Para ello se variaron una serie de parámetros, como son la composición química del fluido portador (se incluyó una cantidad creciente de vapor de agua) y la velocidad del fluido portador, desde varios metros por segundo hasta velocidades sónicas. En esta primera serie, se emplearon únicamente aerosoles sólidos (dióxido de estaño).

En marzo de 1998, se realizó con éxito el primer experimento con mezcla de aerosoles líquidos y sólidos (dióxido de estaño e hidróxido de cesio).

Las mediciones en línea y post-test, permiten conocer la granulometría de los aerosoles suspendidos, la velocidad de deposición, el tipo de depósito y, finalmente, la variación en el tiempo del espesor, densidad y composición del depósito. Con ello, se conocen los parámetros más significativos de los aerosoles, incluso pocas horas después de la deposición, antes de pasar a la fase de resuspensión.

Los cinco primeros experimentos oficiales llevados a cabo no incluyeron la fase de resuspensión, ya que en ellos se pretendía conocer la bondad de la instalación para alcanzar los valores deseados de los parámetros básicos que caracterizan la deposición (tipo, densidad superficial y espesor del depósito). Posteriormente, se han repetido estos experimentos, incluyendo la fase de resuspensión.

Dada la gran versatilidad de la instalación, se podrían realizar experimentos similares en otros componentes de la central, como tuberías más complicadas con codos, un generador de vapor o una vasija.

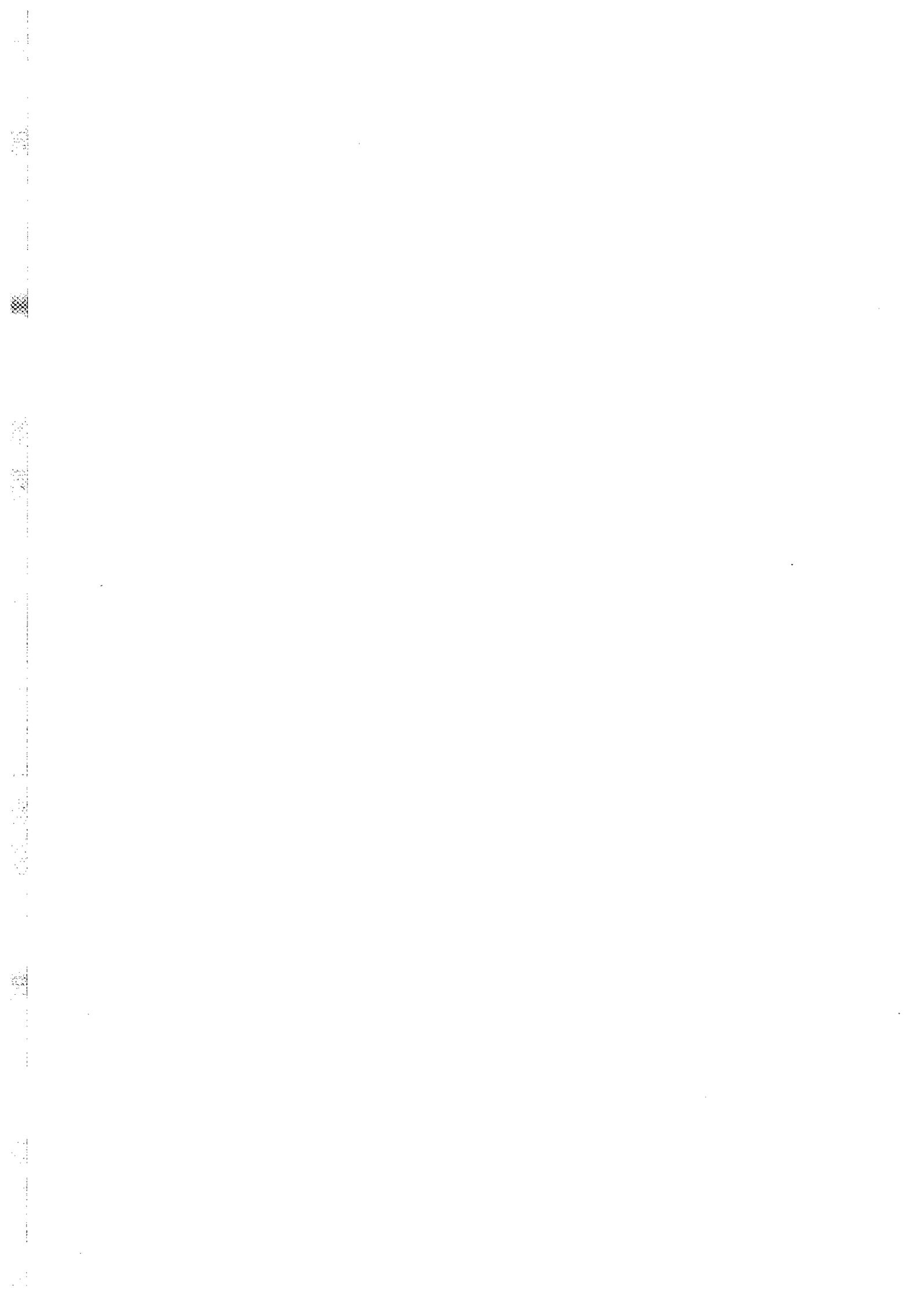
Desde su inicio el proyecto ha recibido un elevado número de sugerencias, en cuanto a futuros procesos a estudiar en esta instalación. Entre ellas, la resuspensión térmica o revaporización, la deposición y resuspensión mecánica en geometrías más complejas y el empleo de aerosoles de distinta composición, están siendo consideradas en la actualidad, como posibles ampliaciones del proyecto.

En diciembre de 1995, tras la presentación de los primeros resultados experimentales y ante la excelente acogida internacional del proyecto, se formó el Comité Científico del STORM, compuesto por 24 miembros de organismos de investigación internacionales, una de cuyas tareas es la definición de la matriz experimental.

Tabla 1. Experimentos STORM

Test	Gas Portador	Velocidad [m/s]	Aislamiento	Aerosol	AMMD [μm]	Masa depositada [g]
SD01	N ₂	12	no	SnO ₂	1.0	74.3
SD02	N ₂	16	sí	SnO ₂	1.0	0.3
SD03	N ₂	15	sí	SnO ₂	1.0	3.2
SD04	N ₂	16	sí	SnO ₂	2.0	100.2
SD05	H ₂ O+N ₂	24	sí	SnO ₂	2.0	18.4
SR06	N ₂	16-90	no	SnO ₂	2.0	51.7
SD07	H ₂ O+N ₂	25	no	SnO ₂	2.0	172
SD08	H ₂ O+N ₂	17	no	SnO ₂	2.0	192
SR09	N ₂	25-60	no	SnO ₂	2.0	119
SR10	H ₂ O+N ₂ /N ₂	25-90	horno	SnO ₂	2.0	9.7
SR11	H ₂ O+N ₂ /N ₂	25-120	horno	SnO ₂	2.0	162
SR12	H ₂ O+N ₂ /N ₂	25-90	horno	SnO ₂	2.0	176
SR13	H ₂ O+N ₂ /N ₂	25-50	horno	SnO ₂	2.0	180
SD14	H ₂ O+N ₂	20	horno	SnO ₂ +10% CsOH	2.0	

II. Mejora del código de cálculo CÆSAR



II. Mejora del código de cálculo CÆSAR

II.1. Estado del arte

La resuspensión de aerosoles radiactivos de las paredes del circuito primario, durante un accidente severo en una central nuclear, es un importante proceso a la hora de evaluar el término fuente. El combustible, con sus productos de fisión, y los materiales estructurales del reactor, tras su vaporización, durante la fusión del núcleo, pueden condensarse o solidificarse al entrar en contacto con un fluido a menor temperatura. Se forman así los aerosoles: partículas sólidas o líquidas, de tamaño comprendido entre 10^{-3} y 10^3 micrómetros, suspendidas en un fluido.

Durante su transporte, estas partículas pueden depositarse en las paredes de los conductos, disminuyendo la cantidad de material radiactivo liberado. Todas las secuencias acaecidas hasta aquí vienen contempladas en la mayoría de los estudios. Pero ciertos procesos pueden causar la reincorporación de estas partículas al flujo principal y, por tanto, contribuyen a un aumento del inventario del material radiactivo que podría pasar a la atmósfera.

Uno de los procesos más importantes que provocan este aumento del término fuente es la resuspensión mecánica de estas partículas depositadas. Debido a este mecanismo, el fluido a alta velocidad que circula por el interior de las tuberías, en cuyas paredes se encuentran adheridas las partículas, desprende y arrastra parte del material depositado, reincorporándolo al flujo principal.

Los métodos numéricos existentes, para la evaluación de la tasa de resuspensión, o bien realizan simples ajustes para alcanzar algún resultado experimental, o introducen simplificaciones que pueden conducir a errores en la estimación de este proceso.

El código de cálculo CÆSAR (*Computational Approach to Experimental Simulation of Aerosol Resuspension*) pretende dar solución a este problema. Se trata de una herramienta matemática para el cálculo de la resuspensión de aerosoles, bajo las condiciones termohidráulicas típicas de los accidentes severos.

En este código se realiza un detallado estudio fluido-dinámico en la región más cercana a la pared (subcapa viscosa), es decir, donde se encuentran las partículas depositadas.

Cuantificada la velocidad del fluido en su módulo y dirección, el código calcula las fuerzas aerodinámicas instantáneas aplicadas en las partículas depositadas o cuando ya se han despegado de la pared (fuerza de arrastre y fuerza ascensional). Estas fuerzas aerodinámicas se contra-

ponen a las adhesivas, que impiden la resuspensión de las partículas. La principal de estas solicitantes, es la fuerza de interacción entre la partícula y la pared.

Conocidas las solicitantes, se integra la ecuación del movimiento, determinando así, la velocidad y consecuentemente la posición de la partícula en cada instante. Se prosigue con el cálculo de una nueva interacción, y así sucesivamente, hasta que la partícula abandona la subcapa viscosa, o se alcanza el límite de tiempo prefijado.

Las mayores ventajas frente a otros modelos son, en primer lugar, el rigor físico de las ecuaciones planteadas que se traduce en unos resultados lógicos en los cálculos de sensibilidad. En segundo lugar, CÆSAR no necesita disponer de antemano de resultados experimentales, para evaluar la resuspensión de los aerosoles, en condiciones semejantes. Se trata por tanto de un código de cálculo capaz de determinar la tasa de resuspensión y no sólo de una herramienta para el análisis de unos resultados o una ampliación de unos datos experimentales, para el estudio predictivo de casos similares.

Los resultados obtenidos son acordes con los datos medidos en diversos experimentos en cuanto a la variación de la tasa de resuspensión con el tiempo. Como ya había señalado Fromentin y más adelante Reeks, la cantidad de partículas que permanecen depositadas decrece siguiendo una ley potencial en función del tiempo. Además, los cálculos de sensibilidad realizados han dado resultados satisfactorios en cuanto a la dependencia de esta tasa con los parámetros más importantes del proceso (tamaño y material de las partículas y velocidad y composición del fluido).

La comparación con resultados experimentales demuestra así mismo la validez del CÆSAR (figura 2). A pesar de una cierta subestimación de la resuspensión (inferior a un 10% de la medida experimental), debido a la no contemplación de la denudación, el código predice una variación similar en el tiempo.

A pesar de estos buenos resultados, CÆSAR presentaba ciertas deficiencias en la modelización de las turbulencias fluidas dentro de la subcapa viscosa y en el cálculo de las fuerzas adhesivas que ligan la partícula a la pared.

Realizadas ya algunas modificaciones en el código y ante el informe de resultados de un comité de expertos RSPUAB (*Reactor Safety Programme User's Advisor Board*), reunido en Ispra el 21 de febrero de 1997, en el que recomendaba la distribución de CÆSAR, se determinó que CÆSAR sería el código empleado por el CCI-Ispra para los cálculos de resuspensión del ISP-40.

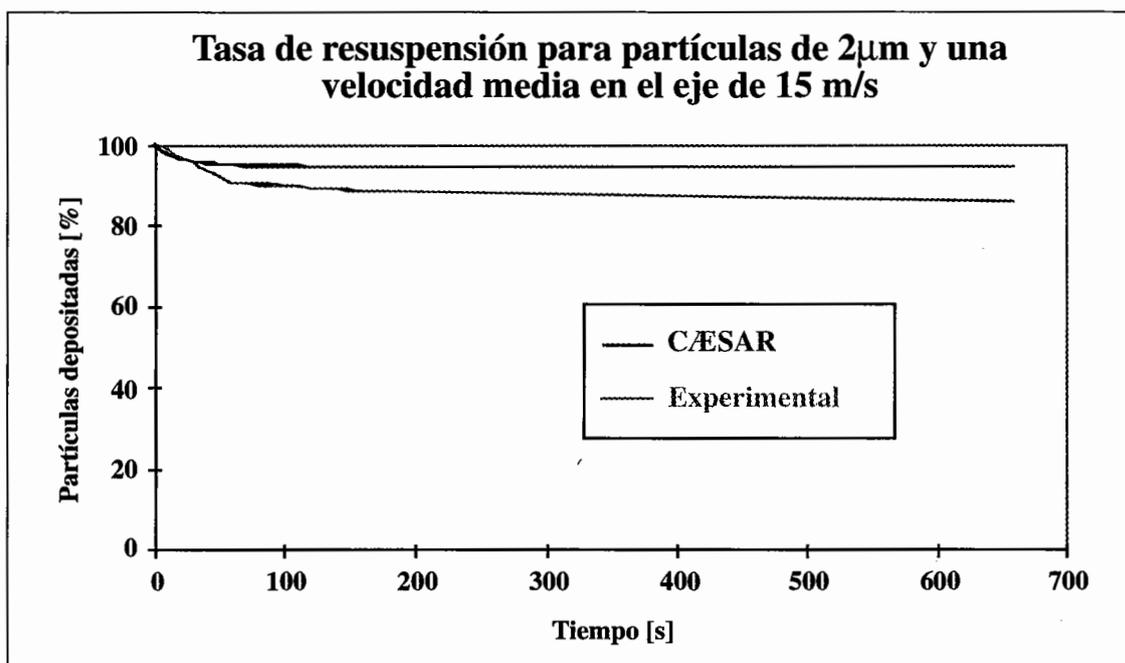


Figura 2. Comparación entre las medidas obtenidas en un experimento en la tubería de calibración del STORM y un cálculo efectuado con CÆSAR.

II.2. Mejora del modelo de la turbulencia en la subcapa viscosa

CÆSAR simula los torbellinos que tienen lugar dentro de la subcapa viscosa y que provocan las eyecciones fluidas hacia la región media del flujo principal, planteando un método innovador que permite definir, de manera estocástica, la intensidad y duración de las interacciones entre el fluido y la partícula. Se obtienen así una serie de eventos aleatorios no correlacionados y cuya duración es independiente de la intensidad de la turbulencia.

Sin embargo, actualmente se reconoce la existencia de una correlación entre las componentes de la velocidad del fluido durante los procesos de eyección de fluido de menor velocidad a la zona central del flujo (figura 3), seguidos de barridos que impulsan al fluido hacia las zonas más próximas a la pared. La combinación de estos dos procesos es llamada *burst*. Estas expulsiones de fluido desde la zona más cercana a la pared (subcapa viscosa) son en gran parte las responsables de la resuspensión de las partículas depositadas que se ven arrastradas por la masa fluida eyectada.

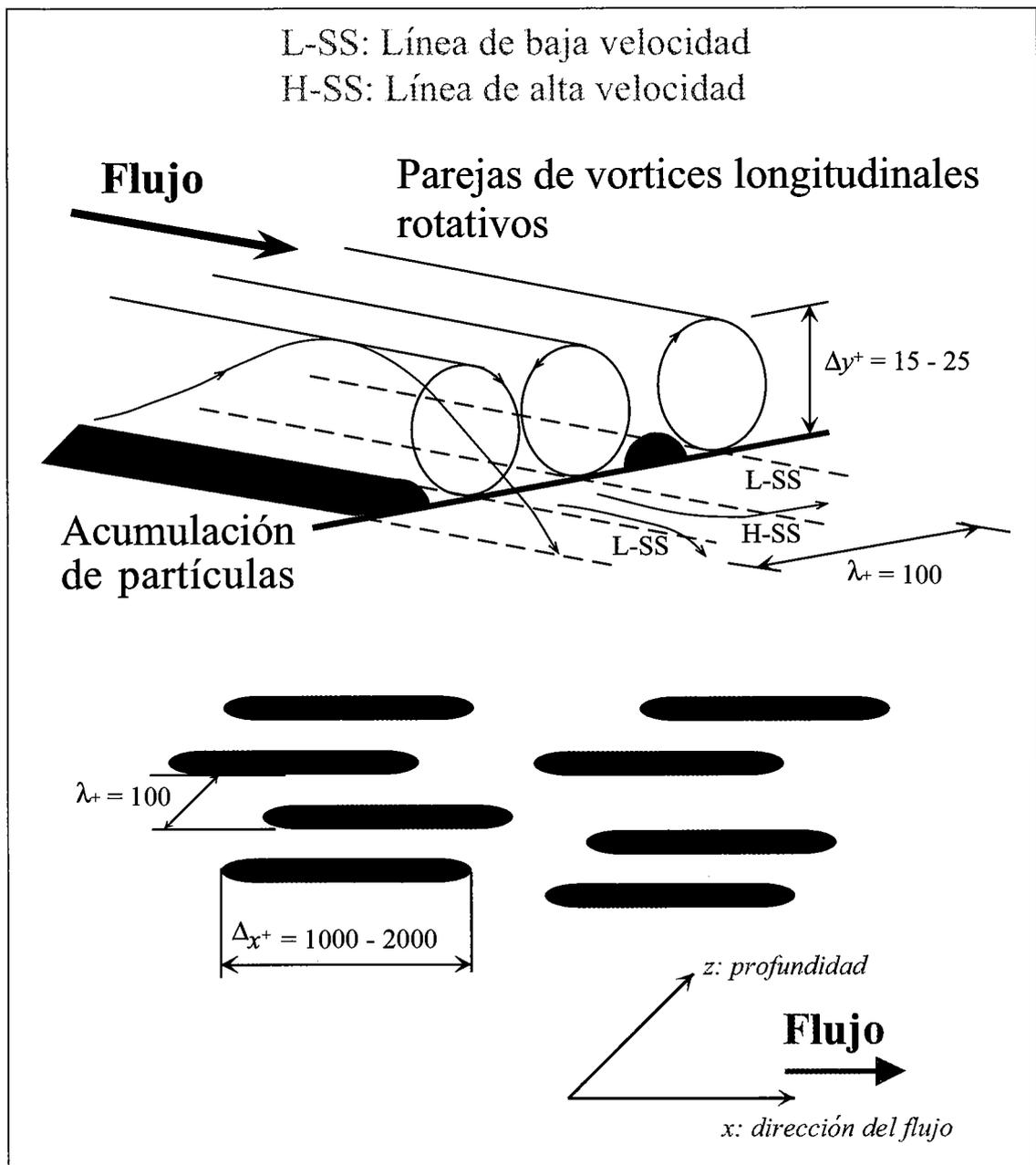


Figura 3. Estructura espacial de las turbulencias y acumulaciones de las partículas en la región cercana a la pared, observadas por Niño y García.

Para poder determinar de forma detallada estos procesos, es decir, la intensidad y duración de estas estructuras fluidas coherentes, su periodicidad, la correlación entre las fluctuaciones de la velocidad y el efecto de la variación instantánea de la vorticidad, se están llevando a cabo una serie de cálculos de simulación directa (*Direct Numerical Simulation*, DNS) en colaboración con la Uni-

versidad Politécnica de Milán. Otro punto importante que se pretende aclarar por medio de dichos cálculos es la existencia física de la subcapa viscosa, es decir, la validez del concepto de región fluida próxima a la pared donde el perfil de velocidades es lineal. De hecho, observaciones realizadas dentro de dicha región sugieren que su espesor no es constante, tal y como predice la teoría, debido a la acción de los *bursts*, que se producen en la región inmediatamente superior (zona de transición o *buffer*).

El trabajo que se está llevando a cabo consiste en una serie de cálculos DNS tridimensionales, tomando 100 celdas en cada una de las tres direcciones y en una escala de tiempos tal que permita adoptar apropiadamente la escala disipativa de Kolmogorov. Los resultados ayudarán a identificar la variación temporal de las medias cuadráticas de las fluctuaciones de las tres componentes de la velocidad del fluido, los valores instantáneos de la velocidad total, la vorticidad y los incrementos de energía y helicidad.

Realizados dichos cálculos, se procederá a la modificación de los valores medios incluidos en CÆSAR y a la incorporación de un modelo que simule la presencia de estas estructuras fluidas coherentes.

II.3. Mejora del modelo de las fuerzas adhesivas

CÆSAR calcula la fuerza adhesiva que liga la partícula con la pared mediante una aproximación microscópica. Para ello, tomando como buena la aproximación de Hamaker, por la que la integración para todas las moléculas de los dos cuerpos puede realizarse mediante su suma, se integra el potencial de Lennard-Jones en su parte atractiva y en la repulsiva. Mediante esta consideración, se va a obtener un potencial compuesto de una parte atractiva y una repulsiva, que permitirá conocer la distancia de equilibrio entre la partícula y la pared, es decir el punto donde se alcanza el valor mínimo del potencial.

Esta fórmula para el cálculo de la fuerza adhesiva es sólo válida para un caso ideal en que la partícula y la pared son indeformables, sus superficies son perfectamente lisas y sus geometrías sencillas: la partícula es una esfera y la pared es un plano infinito.

A pesar de la validez teórica de dicha fórmula, los resultados obtenidos por M. Paul de la Universidad de Bristol, demuestran que la fuerza adhesiva así calculada viene sobrestimada al compararla con las medidas experimentales para los casos reales, en los que la superficie de contacto no es perfectamente lisa. Estas conclusiones han recibido ya su visto bueno por parte de ciertos

expertos de la materia, como M. Reeks, ya que confirman la necesidad de la introducción de un radio de contacto equivalente.

En su análisis para el proyecto STORM, M. Paul obtuvo unos resultados experimentales inferiores en casi tres órdenes de magnitud a los resultados teóricos, obtenidos con la fórmula empleada en CÆSAR. En la versión previa de CÆSAR, la fórmula teórica venía multiplicada por el coeficiente corrector 10^{-3} constante.

En segundo lugar, CÆSAR no contempla la deformación de las partículas depositadas (figura 4). Se trata de un modelo microscópico que no introduce la deformación de los cuerpos en contacto, observada y caracterizada en otras teorías.

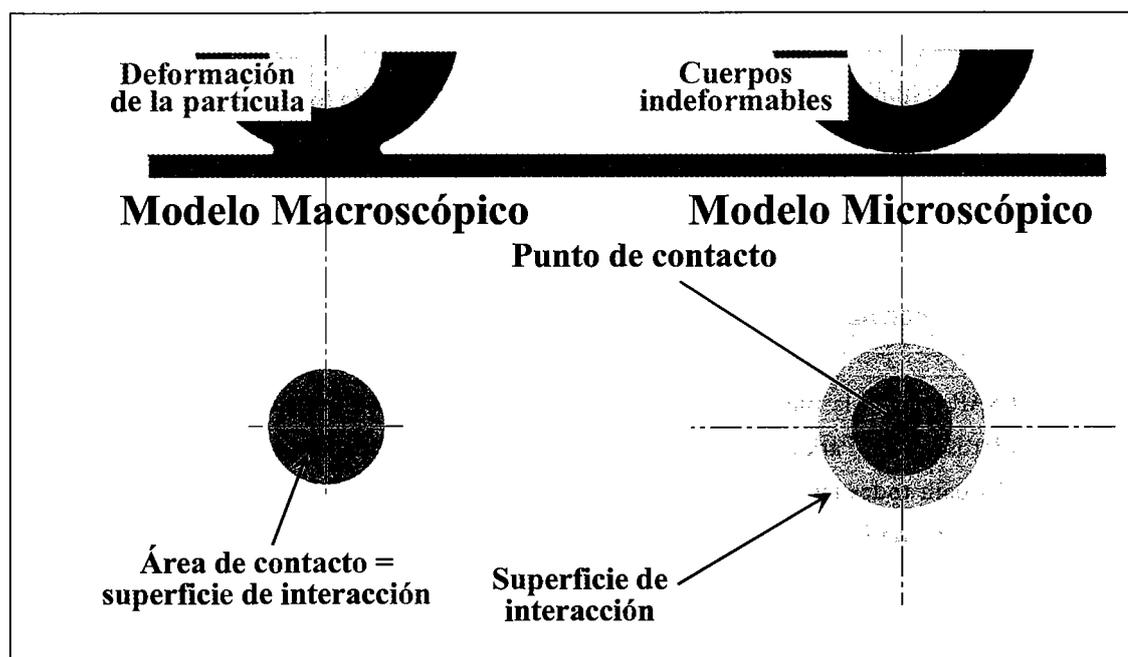


Figura 4. Deformación en el contacto en el modelo macroscópico (deformación de Hertz) y en el microscópico (cuerpos ideales).

Para solventar estos problemas, se ha modificado el modelo para el cálculo de las fuerzas adhesivas incluido en CÆSAR. Así, en la actualidad CÆSAR cuenta con un modelo aleatorio para el cálculo de la superficie de contacto entre la partícula y la pared. Con ello se obtiene, en primer lugar, un modelo con mayor rigor físico ya que se introducen las deformaciones de las partículas y, en segundo lugar, unos resultados teóricos acordes con las medidas experimentales.

Para ello, se considera que la partícula es una esfera lisa e indeformable y la superficie viene tratada como una coraza rugosa. Las irregularidades se localizan espacialmente siguiendo una ley de distribución gaussiana. Como se comprueba en la figura 5, la densidad del material de la pared decrece desde la superficie interna, donde parte de un valor nominal n_0 , correspondiente a la densidad del material compacto, hasta el pico más alejado, donde la densidad pasa a anularse. El espesor de esta coraza rugosa viene determinado por la altura de la mayor aspereza de la pared.

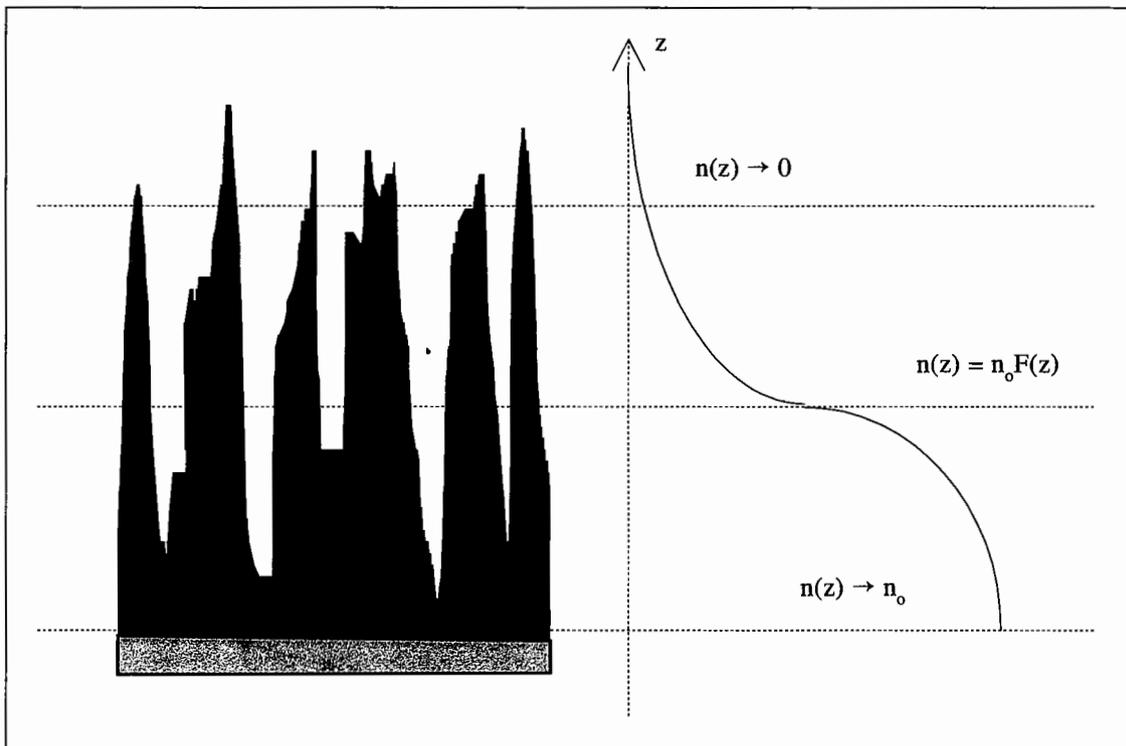


Figura 5. Función de distribución de la densidad dentro de la corteza rugosa.

El cálculo de la energía atractiva (figura 6) que liga la partícula a la pared del depósito, se realiza integrando ambos términos (atractivo y repulsivo) de la expresión de Lennard-Jonnes sobre todas las moléculas de los dos cuerpos.

La figura 7 muestra los resultados de la transformación del potencial adhesivo dentro de CÆSAR. Las curvas representan las distintas energías adhesivas para tres tipos de superficies: una superficie lisa (antiguo modelo incluido en CÆSAR) y dos superficies rugosas (con una rugosidad media de 5 y 0,5 micras respectivamente), en función del tamaño de la partícula.

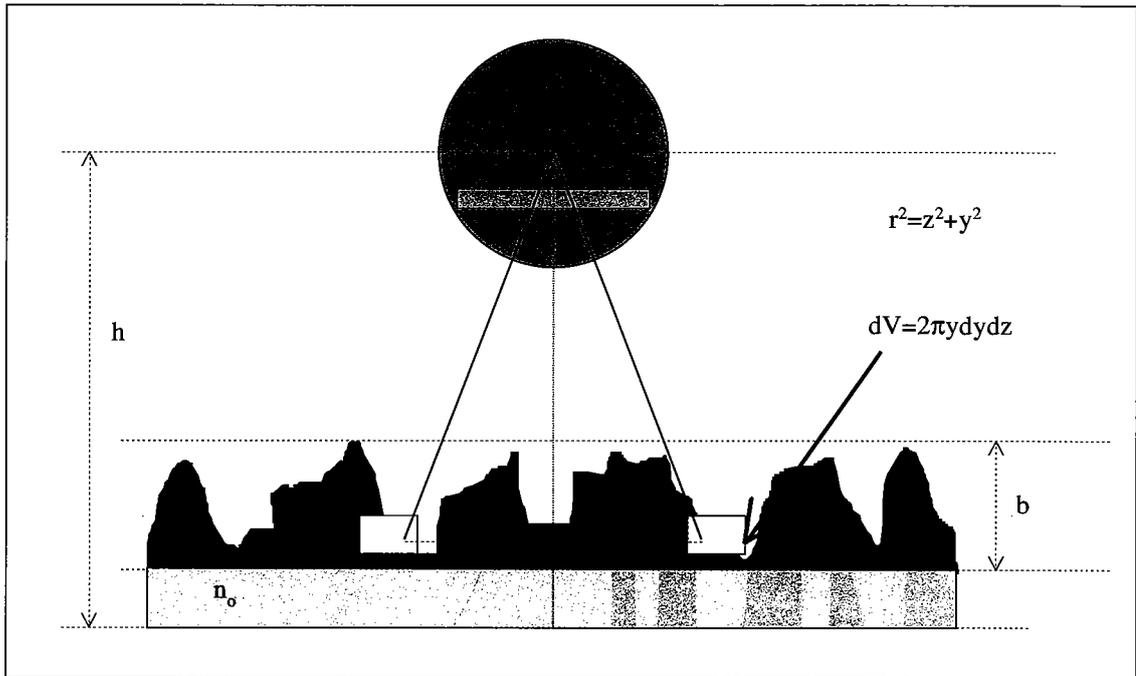


Figura 6. Interacción entre las partículas de la partícula y la pared.

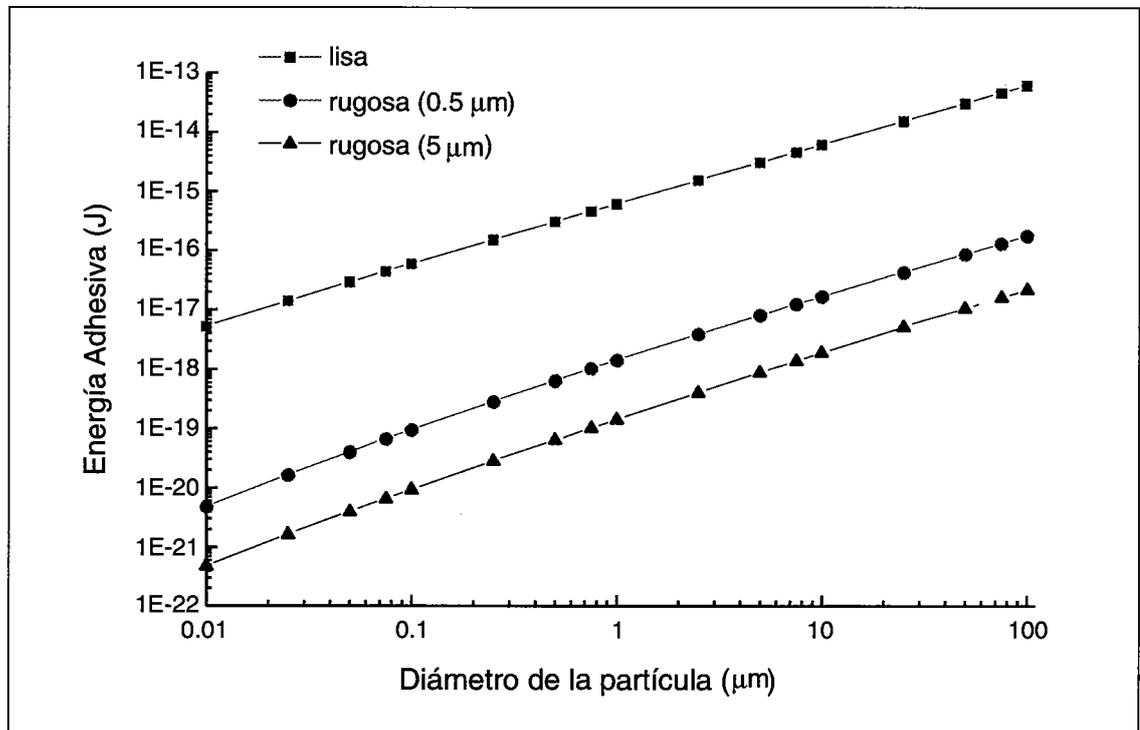


Figura 7. Interacción entre las partículas de la partícula y la pared.

El potencial adhesivo es proporcional al diámetro de la partícula e inversamente proporcional a la altura media de la rugosidad.

Las predicciones del nuevo modelo para el cálculo de la fuerza adhesiva son consistentes con los resultados medidos en el laboratorio para las partículas recogidas en STORM.

II.4. Resultados

CÆSAR ha sido el código de cálculo empleado por tres organismos (CSN, CIEMAT y JRC-Ispra) para participar en el ejercicio de resuspensión del Problema Estándar Internacional ISP-40 (figura 8). La versión empleada fue la que incluía el nuevo modelo para el cálculo de las fuerzas adhesivas.

Los resultados obtenidos con CÆSAR se ajustan muy bien a los datos experimentales para velocidades inferiores a 100 m/s. A partir de esa velocidad, CÆSAR sobrestima la cantidad de partículas resuspendidas. Probablemente se podrá resolver este problema cuando se mejore el modelo de las turbulencias, gracias a los datos generados con los cálculos de simulación directa.

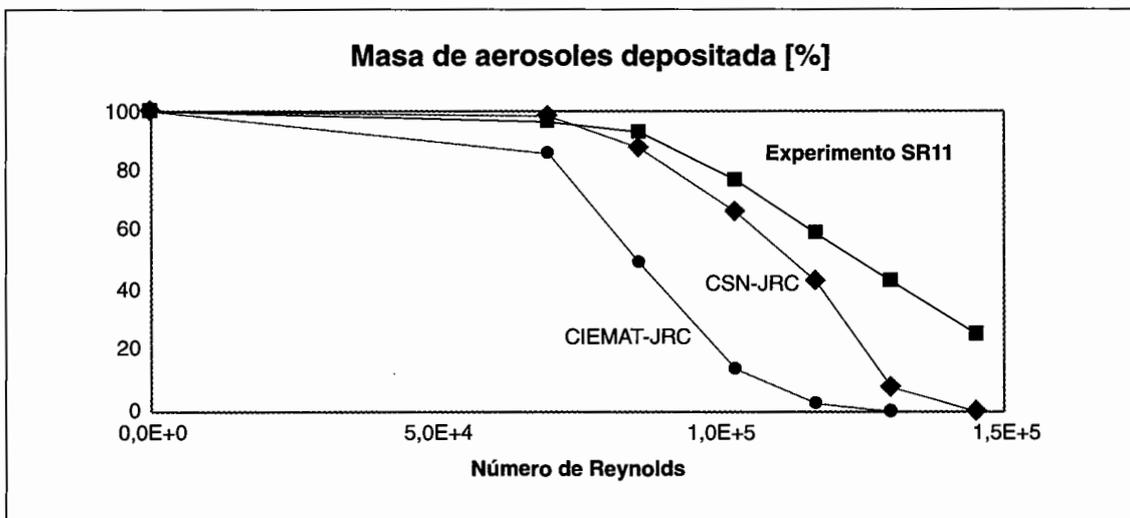
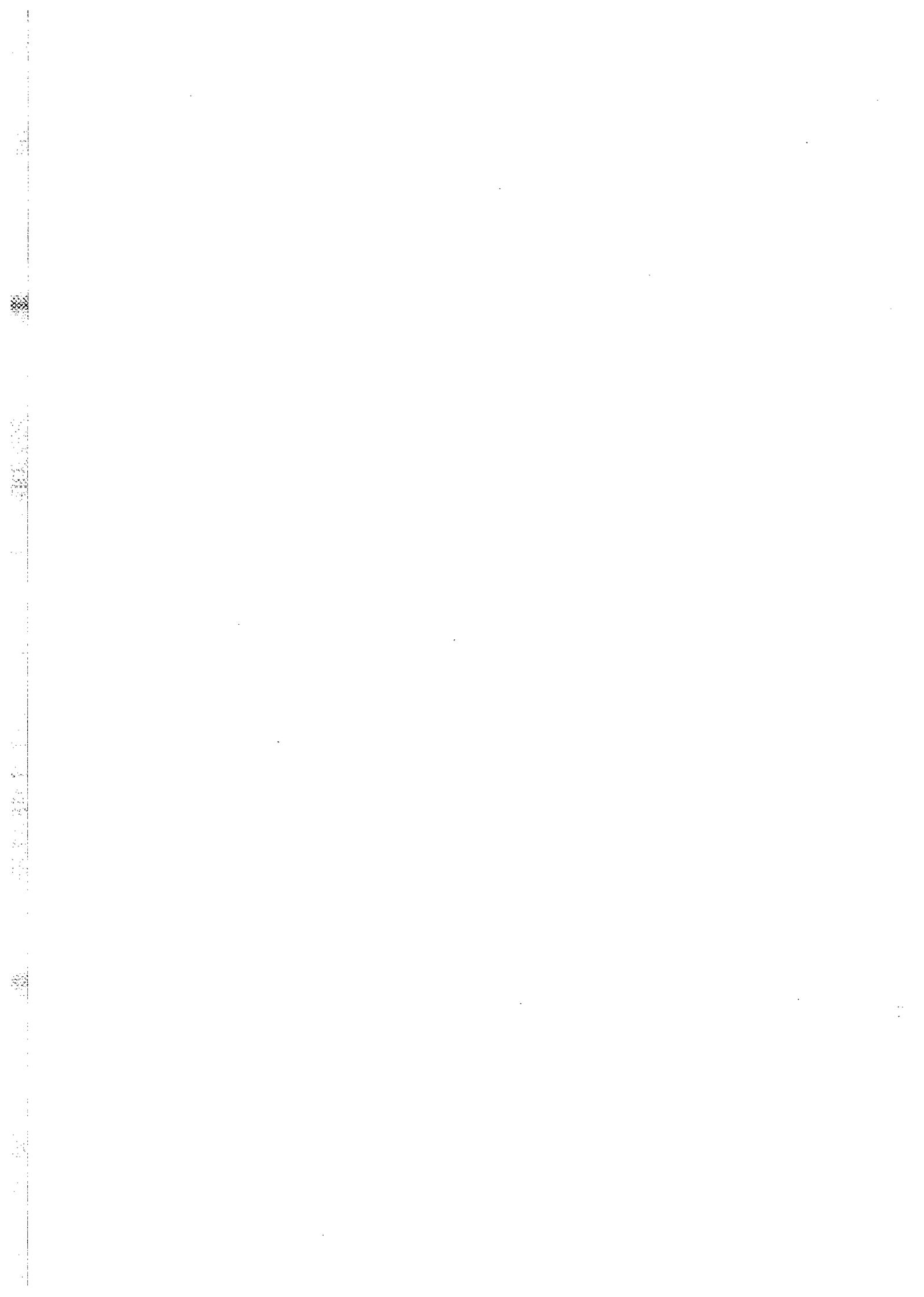
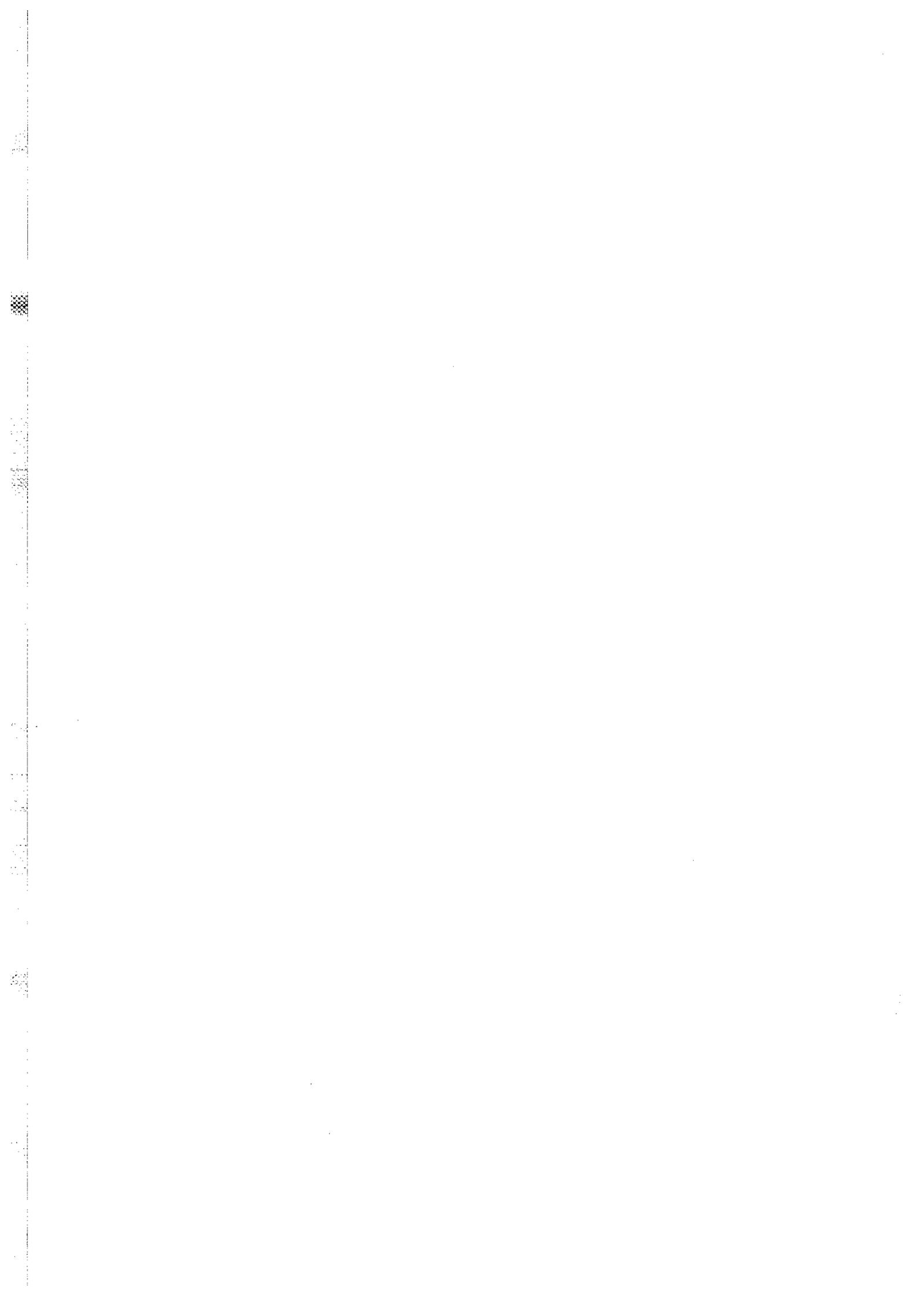


Figura 8. Resultados de CÆSAR en el ejercicio ISP-40.



III. Coordinación del ISP-40



III. Coordinación del ISP-40

En diciembre de 1996, ante la acogida internacional del proyecto STORM, la OCDE decidió organizar un Ejercicio Estándar Internacional basado en uno de los experimentos STORM. Para ello, tras contactar con un gran número de instituciones Comunitarias y Extracomunitarias (Universidades, Centros de Investigación y Organismos Reguladores), se convocó una reunión inicial para los días 17 y 18 de marzo de 1997 en el CCI-Ispra.

Tabla 2. Participantes al ISP-40 basado en un experimento STORM y códigos empleados

Organización	País	Deposición	Resuspensión
CIEMAT	España	VICTORIA	CÆSAR
ENEA	Italia	MELCOR 1.8.3	
ENEL	Italia	ECART	ECART
ETH	Suiza		ETH
GRS	Alemania	SOPHAEROS 1.3	SOPHAEROS 1.3
CEA - IPSN/ SEAC	Francia	AEROSOLS-CIRCUIT	
CEA - IPSN/DRS	Francia	SOPHAEROS 1.3	SOPHAEROS 1.3
JAERI	Japón	ART	ART
JRC	Unión Europea	SOPHAEROS 1.1 RAFT DeNIRO	CÆSAR
KINS	Corea	MELCOR 1.8.3.	VICTORIA
KURCHATOV	Rusia	MELCOR 1.8.3	
TRACTEBEL	Bélgica	MELCOR	
Universidad BOCHUM	Alemania	ATHLET/CD MELCOR 1.8.3	
Universidad KARLSRUHE	Alemania	MARIE 2.3	
Universidad PISA	Italia	ECART	ECART
VEIKI	Hungría	VICTORIA MELCOR	VICTORIA

En esta primera reunión se presentaron las bases principales para determinar el tipo de experimento que debía realizarse y se determinaron los cálculos que habrían de realizar las instituciones participantes en dicho ejercicio ISP-40: dos series de cálculos, una para la deposición, cuyos resultados debían ser entregados antes del 30 de septiembre de 1997, y una para la resuspensión, cuya fecha límite fue el 31 de enero de 1998.

El primer documento distribuido fue el *ISP-40 - STORM Facility Data Book* en el que se recoge la descripción exhaustiva del tramo de la instalación STORM donde deben realizarse los cálculos. Para su redacción, se tomaron los valores de diseño de cada componente y se introdujeron las modificaciones realizadas en su montaje final. Se trata por tanto del documento más completo y preciso de la instalación STORM, ya que recoge los valores geométricos reales.

Asimismo se enviaron los datos termohidráulicos necesarios para los cálculos de deposición. Para ello, se tomaron los datos de la temperatura del fluido, la temperatura externa de la pared, la presión en el interior del conducto y el caudal másico medio de fluido portador y de los aerosoles, medidos durante las dos horas y media que duró la fase de deposición, en más de 100 puntos. Con estos datos, se calcularon las temperaturas internas de la pared y los caudales máxicos instantáneos del fluido portador y de los aerosoles.

Recibidos los resultados de los cálculos de deposición, se enviaron los datos de entrada para el ejercicio de resuspensión. Para ello se realizaron los mismos cálculos termohidráulicos llevados a cabo para la fase de deposición. Además, se tuvo que determinar el tamaño medio de las partículas resuspendidas y su desviación estándar. Con este fin, se recogieron los datos obtenidos con los impactores de cascada en cada una de las etapas de la resuspensión, y se ajustaron estos valores experimentales a distribuciones bimodales logarítmico-normales (figura 9).

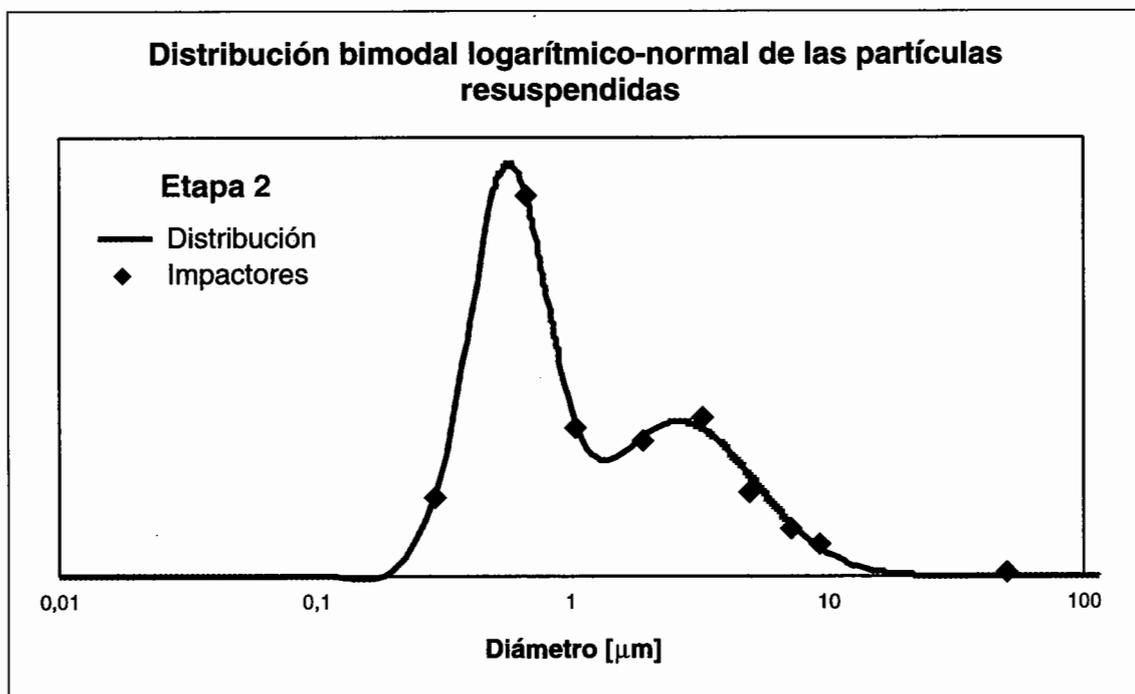


Figura 9. Distribución de las partículas resuspendidas en la segunda etapa.

En enero de 1998, durante una inspección de la instalación STORM, se detectó el mal funcionamiento de uno de los equipos de medida para el caudal del vapor. Este problema conllevaba un error en los datos distribuidos hasta la fecha de más del 20 % del caudal de vapor de agua. Durante la segunda reunión oficial del ISP-40 (marzo de 1998), se comunicó este error a los participantes y se les permitió volver a realizar los cálculos de deposición con los datos correctos. La fecha límite de entrega de los mismos quedó fijada para el 15 de mayo de 1998.

A primeros de junio de 1998, se envió el primer borrador del ejercicio comparativo ISP-40, con los nuevos resultados. Finalmente, en junio de 1998, se mantuvo la última reunión oficial del ISP-40, donde se aprobó la versión del Informe Oficial que ha sido enviada al PWG-4. En septiembre de 1998, este Grupo de Trabajo se reunió y emitió su parecer sobre dicho informe. La versión corregida se envió seguidamente a la OCDE, que deberá dar su visto bueno para la distribución del Informe.

III.1. ISP-40: Resultados del ejercicio de deposición

Durante la fase de deposición, las partículas generadas con las antorchas de plasma circulan por la tubería de prueba donde pueden depositarse. Las características principales de dicha fase se recogen en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones iniciales y de contorno y resultado final de la fase de deposición

Duración [s]		9000
Caudal [kg/s]	Vapor	$1,106 \cdot 10^{-2}$
	Nitrógeno	$0,547 \cdot 10^{-2}$
	Aire	$0,573 \cdot 10^{-2}$
	Argón	$0,719 \cdot 10^{-2}$
	Helio	$0,012 \cdot 10^{-2}$
Temperatura media de la pared [C]		230
Temperatura media del fluido [C]		340
Presión media [Pa]		$1,01 \cdot 10^5$
Aerosoles		SnO ₂
Caudal [kg/s]	SnO ₂	$3,83 \cdot 10^{-4}$
Diámetro geométrico medio [m]		$0,43 \cdot 10^{-6}$
Masa de aerosoles depositada en la tubería de prueba [kg]		0,162

Se recibieron un total de 22 resultados de cálculo procedentes de 15 organismos internacionales. Además, diversos organismos realizaron cálculos de sensibilidad.

El número de códigos empleados se reduce a nueve, con una clara preferencia por el código MELCOR (siete cálculos). La gran mayoría de los participantes empleó códigos comerciales, desarrollados para el cálculo del término fuente en accidentes severos en centrales nucleares. Sin embargo, otros dos nuevos códigos fueron presentados, lo que demuestra el interés existente aún en la actualidad en este tema.

La tendencia general parece sobrestimar la masa total de partículas depositadas, cuya consecuencia inmediata podría ser la infravaloración de la cantidad de material radiactivo que podría escapar a la atmósfera en caso de accidente (figura 10). Sin embargo, la mayoría de estos códigos no incluye un módulo para el cálculo de la resuspensión, y la pequeña diferencia existente entre los datos experimentales y los cálculos efectuados, podría ser insignificante.

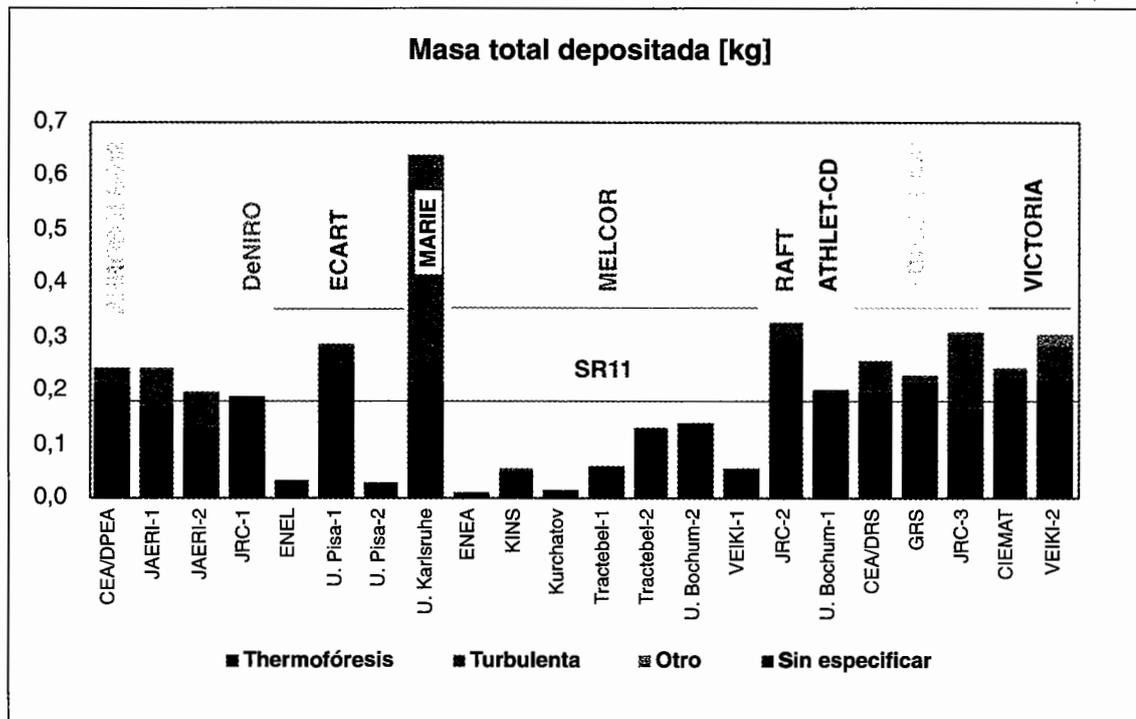


Figura 10. Resultados de los cálculos para el ISP-40 (ejercicio de deposición).

La gran excepción es el código MELCOR, que infravalora en mucho la masa de partículas depositadas. Esto es debido en parte a la no inclusión en MELCOR de un modelo para el cálculo de la resuspensión.

culo de la deposición inercial, dado que el código fue desarrollado para otro tipo de instalaciones (principalmente para la contención). Sin embargo, se detectaron otros problemas debidos principalmente a la dificultad de determinar ciertos parámetros de entrada. Esto queda de manifiesto si se comparan los distintos resultados obtenidos con MELCOR por diferentes participantes.

El código MARIE desarrollado por la Universidad de Karlsruhe, es el que predijo una mayor masa de partículas depositadas. De hecho, el ISP-40 permitió sacar a la luz un problema existente en MARIE concerniente al modelo con el que se simulan las turbulencias del fluido en la región más cercana a la pared.

III.2. ISP-40: Resultados del ejercicio de resuspensión

La fase de resuspensión está constituida por 6 pasos, con velocidades ascendentes del fluido portador (tabla 4).

Tabla 4. Condiciones iniciales y de contorno y resultado final de la fase de resuspensión

	Paso1	Paso2	Paso3	Paso4	Paso5	Paso6
Gas	N ₂					
Caudal [kg/s]	0,102	0,126	0,152	0,175	0,199	0,224
Temperatura media del gas [C]	350	362	362	363	364	364
Presión media [Pa]	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Diámetro geométrico medio de las partículas resuspendidas [µm]	2,97	2,10	2,92	2,00	1,91	1,94
Masa de partículas resuspendida [g]	6	5	27	28	26	28

Una de las mayores dificultades con la que se encontraron los participantes al ISP-40 fue la de reproducir las condiciones iniciales, es decir, crear un depósito de partículas como el que se obtuvo en el experimento SR11, al final de la fase de deposición.

Los resultados obtenidos por los 10 participantes al ejercicio de resuspensión, vienen recogidos en la figura 11.

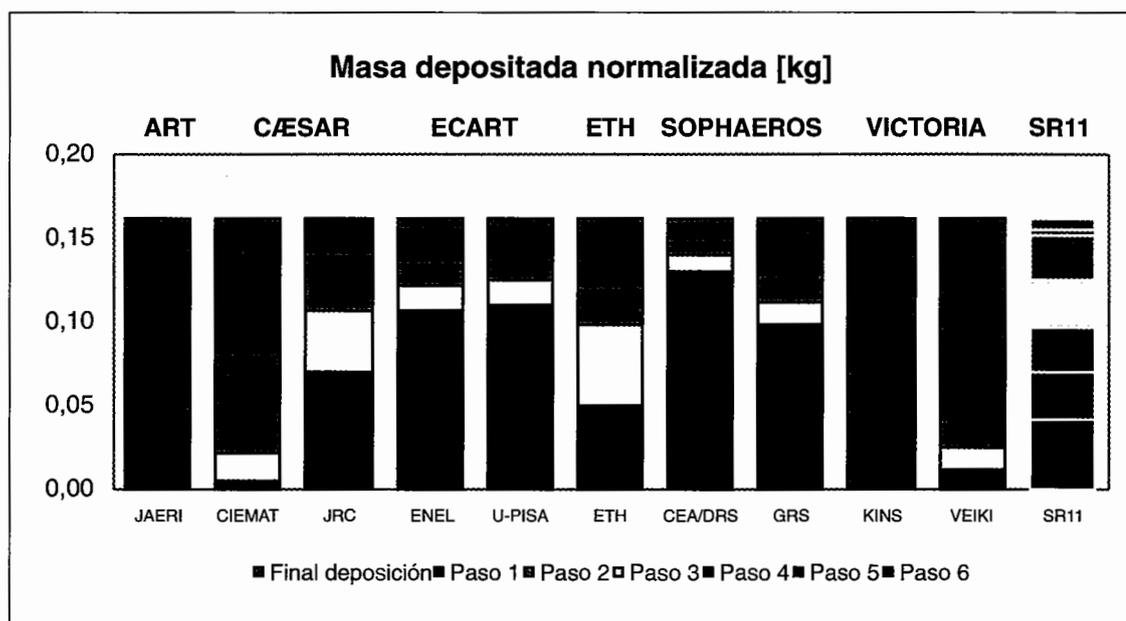


Figura 11. Resultados de los cálculos para el ISP-40 (ejercicio de resuspensión).

Los resultados pueden englobarse en tres grupos. Los resultados de SOPHAEROS y ECART predicen poca resuspensión y como consecuencia, una gran cantidad de aerosoles permanece depositada al final del sexto paso. VICTORIA y ART predicen lo contrario, es decir, la resuspensión de prácticamente todo el depósito a los pocos segundos del primer paso. CÆSAR y ETH predicen una tasa de resuspensión baja (semejante a SOPHAEROS y ECART) en los primeros pasos, que crece gradualmente, hasta prácticamente la resuspensión total del depósito en el sexto paso.

Un resultado importante sólo observado por los códigos CÆSAR y ETH, es la rapidez con la que se da la resuspensión. Así, las partículas que se resuspenden, lo hacen en los primeros segundos de cada paso, quedando el depósito inalterado hasta el paso siguiente.

En cuanto al tamaño de las partículas resuspendidas (figura 12), la mayoría de los cálculos predijeron partículas resuspendidas de tamaño mucho menor al observado en el experimento SR11. Esto se debe a que estos códigos no contemplan la posibilidad de aglomeración en el depósito. Las partículas que se resuspenden tienen por tanto el mismo tamaño que tenían cuando se depositaron.

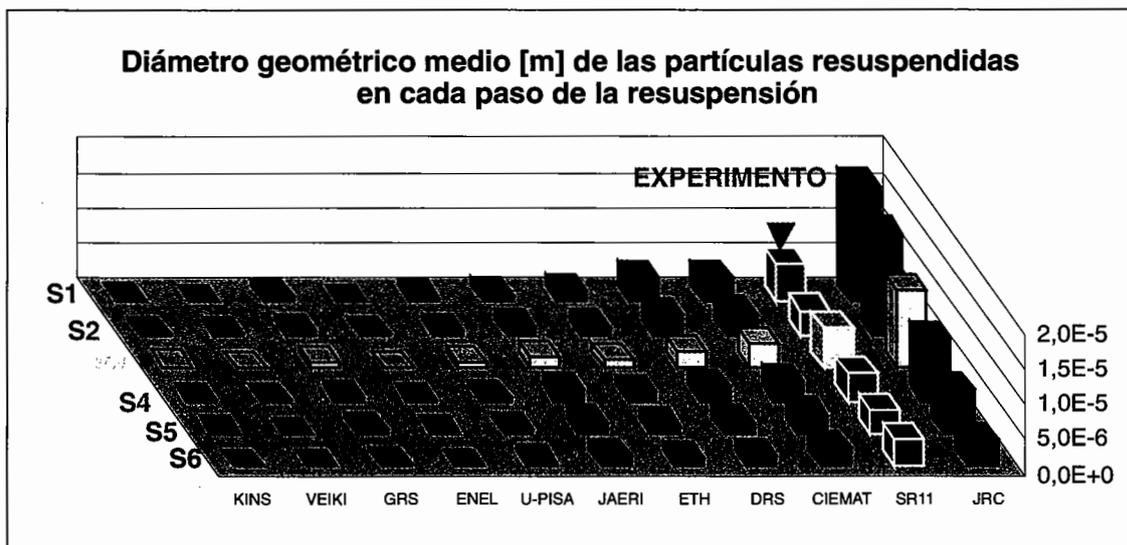


Figura 12. Resultados de los cálculos para el ISP-40 (ejercicio de resuspensión).

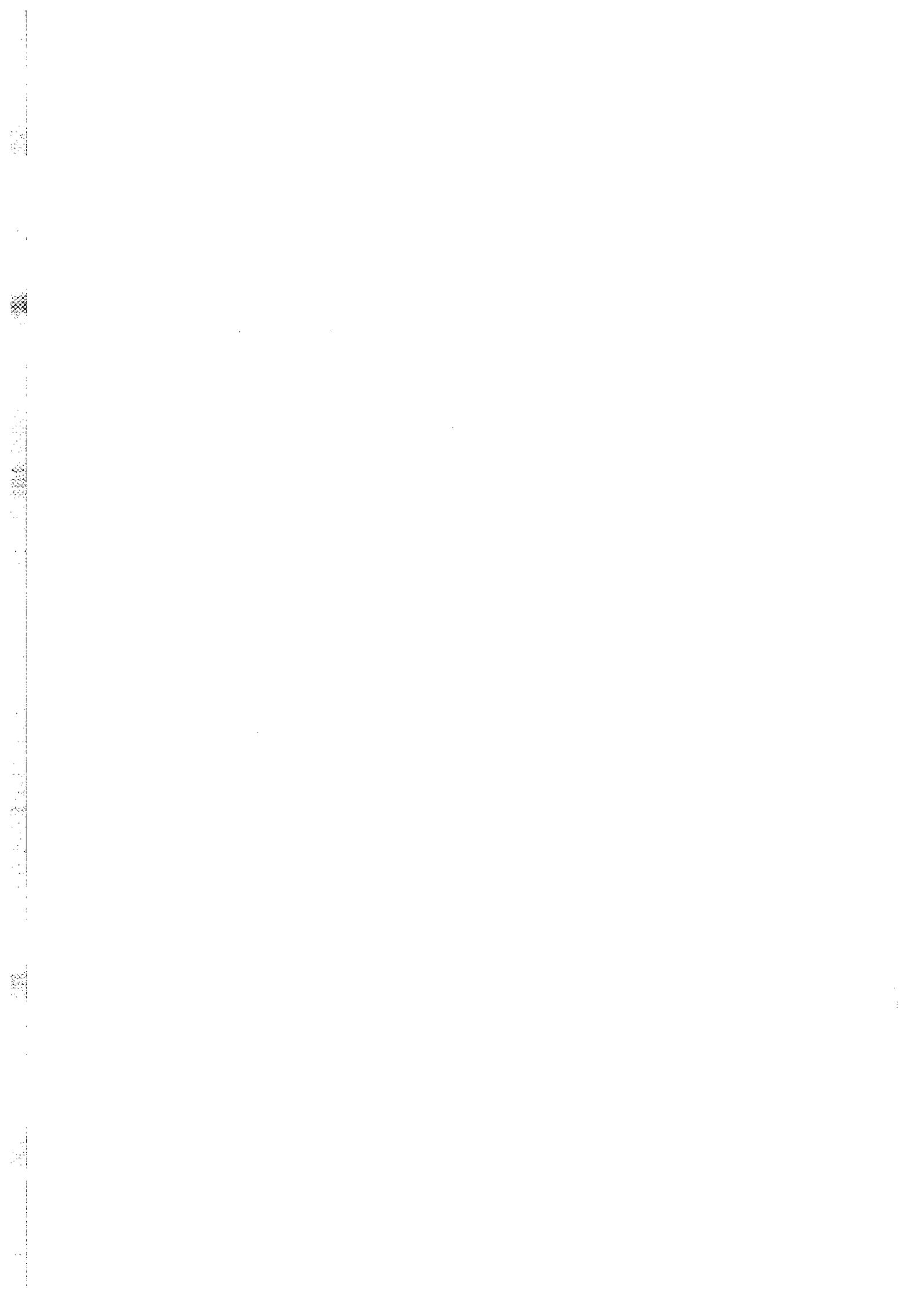
III.3. Conclusiones específicas del ISP-40

Las principales conclusiones extraídas del ISP-40 pueden resumirse en:

- El modelo de deposición termoforética empleado por los códigos actuales es adecuado. Los códigos predijeron correctamente la importancia de este proceso y la ecuación de Talbot, empleada por los códigos más recientes, reproduce adecuadamente los resultados experimentales.
- Existe aún una gran laguna en la modelización de la deposición inercial. Algunos códigos no incluyen ni siquiera este mecanismo de deposición.
- La deposición y la resuspensión de las partículas son procesos que deben ser estudiados conjuntamente. Existe una clara evidencia de la superposición de estos dos procesos y prácticamente ningún código los considera simultáneamente.
- La retención de aerosoles depende fuertemente de las condiciones termohidráulicas. Para poder determinar la deposición y resuspensión de las partículas es necesario contar con un código capaz de reproducir adecuadamente las condiciones de presión y temperatura.
- Los códigos unidimensionales producen resultados satisfactorios en la modelización de flujos turbulentos en tuberías rectas.
- El uso de códigos mecanicistas produce resultados más acordes con los experimentos pero conlleva la dificultad de tener que conocer parámetros de partida generalmente no medidos.

- Como norma general, los códigos tienden a sobrestimar la cantidad de partículas depositadas. Este resultado no conservativo (la cantidad de material radiactivo liberada podría ser mayor de la predicha), queda corregido con la inclusión de la resuspensión durante la fase de deposición.
- La resuspensión de partículas puede tener una gran influencia en el término fuente para el caso de depósitos secos en condiciones de flujo turbulento. El efecto de la presencia de líquido en el depósito debe ser aún investigado.
- El potencial de la resuspensión depende directamente de las características del depósito. La mayor o menor compactación del depósito conllevará una resuspensión totalmente diversa.
- Los modelos de deposición deben dar una información clara sobre el estado del depósito y no sólo calcular la masa depositada. Las características del depósito dependen directamente de los mecanismos de deposición.
- Se deben realizar experimentos de efectos separados para determinar la importancia de los procesos físico-químicos de la deposición.
- Los modelos de resuspensión mono-capas deberían ser sólo un primer paso para llegar a los modelos multicapas y poder reproducir las condiciones reales.

IV. Análisis post-test de los aerosoles recogidos en los experimentos STORM



IV. Análisis post-test de los aerosoles recogidos en los experimentos STORM

Hasta ahora, los datos disponibles para caracterizar los aerosoles generados, depositados y resuspendidos en la instalación STORM se reducían a las medidas realizadas con los filtros, impactores de cascada, sistemas ópticos y el gamma-densitómetro. Con ello, se pueden determinar los caudales de partículas en suspensión, sus tamaños medios y el espesor de los depósitos.

Sin embargo, no se conocen parámetros importantes como son las distribuciones de los tamaños, la forma de las partículas, su densidad y porosidad. Además, a la vista de las siguientes series experimentales, donde se emplean partículas de hidróxido de cesio y de dióxido de estaño, es imprescindible poder determinar la composición química de los aerosoles depositados y de los resuspendidos.

Para poder realizar estos estudios, se ha montado un laboratorio de análisis post-test. En él se examinan las partículas recogidas de las paredes de las tuberías de la instalación STORM y de los filtros e impactores, tras la finalización de los experimentos.

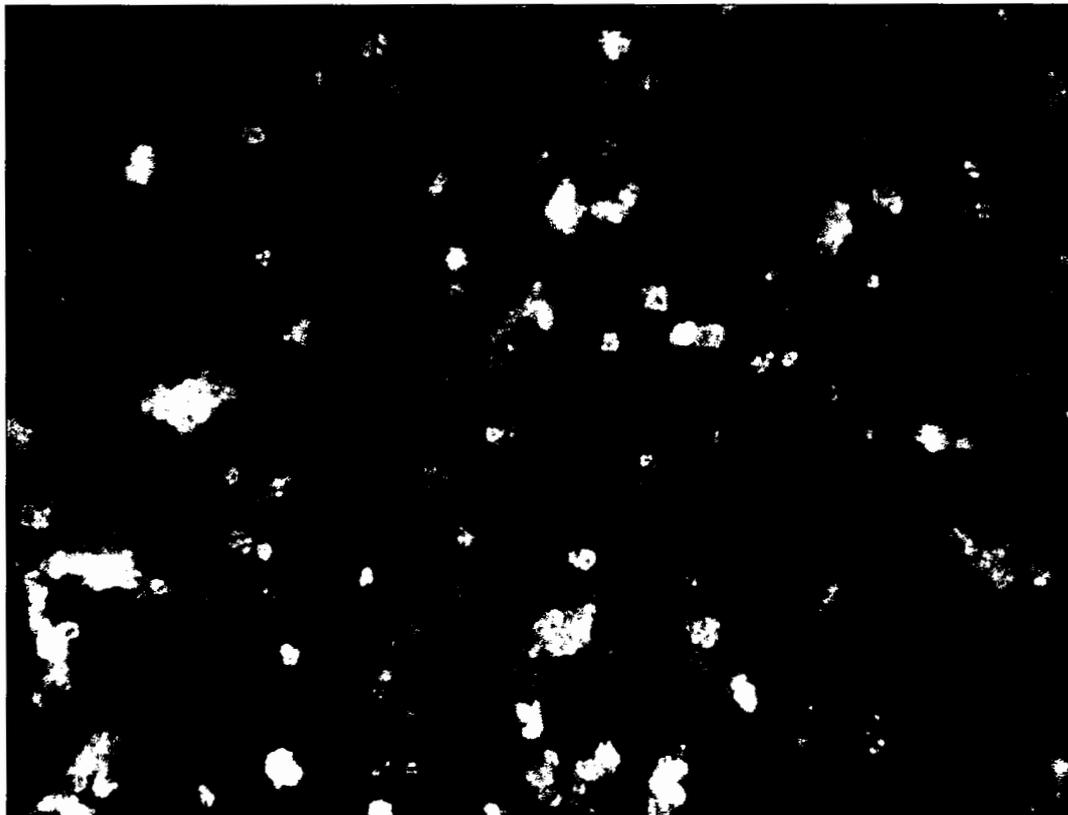


Figura 13. Partículas sencillas ($1\text{ cm} \approx 6\ \mu\text{m}$).

IV.1. Análisis de las partículas con el microscopio óptico

La caracterización de los tamaños, morfología y porosidad de las pruebas recogidas se realiza mediante un microscopio óptico de gran resolución (1.500 aumentos). Se disuelven las partículas recogidas en una disolución acuosa y se someten durante un período de tiempo determinado a la acción de un equipo de ultrasonidos para la destrucción de los aglomerados. Se pueden así observar las partículas iniciales, producidas en las antorchas de plasma (figura 13), y con las partículas recogidas y no tratadas (figura 14), se puede determinar la importancia de los procesos de aglomeración acaecidos en el interior de la Cámara de Mezcla.

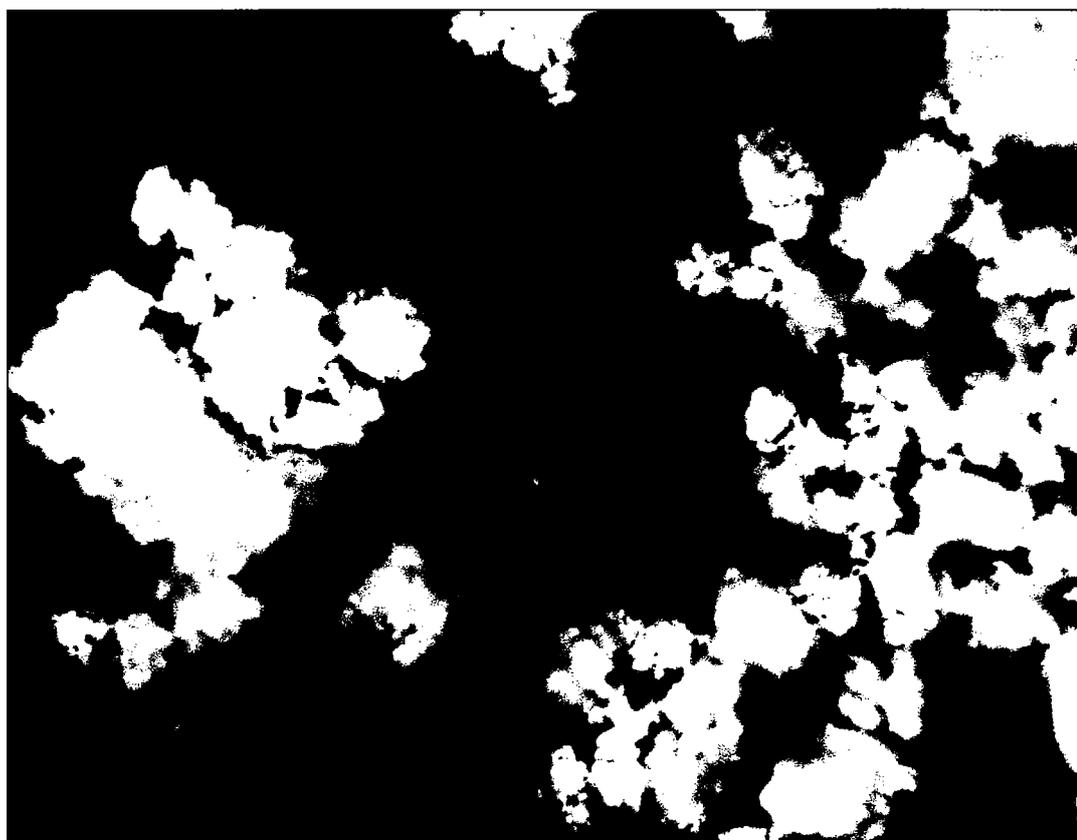


Figura 14. Partículas compuestas: aglomerados ($1\text{ cm} \approx 200\ \mu\text{m}$).

IV.2. Análisis químico de las partículas con el XRF

En cuanto al análisis químico de los aerosoles, se cuenta con un *Elemental XRF Analyser* de la ACAX. Las muestras recogidas se someten a la radiación emitida por una fuente de Ameri-

cio 241 de 300 mCi, que provoca la transición de los electrones orbitales de las muestras bombardeadas y consecuentemente, la emisión de rayos X, al retornar a su configuración elemental más estable. La energía de estos fotones emitidos es característica de cada elemento, pudiéndose así efectuar el análisis cualitativo de las muestras. Además, la cantidad de fotones emitidos es proporcional a la masa de dicho elemento en la muestra, con lo que se realiza también un análisis cuantitativo.

Para poder realizar las primeras medidas con muestras de aerosoles de dióxido de estaño, se ha realizado la calibración del instrumento para cada tipo de filtro (figura 15): cuatro en total, tres para las distintas cascadas de los impactores y una para los filtros principales. Se prosiguió con la calibración de los mismos filtros con depósitos de hidróxido de cesio, para así realizar los primeros análisis de los experimentos STORM con mezclas de aerosoles sólidos y líquidos en octubre de 1997.

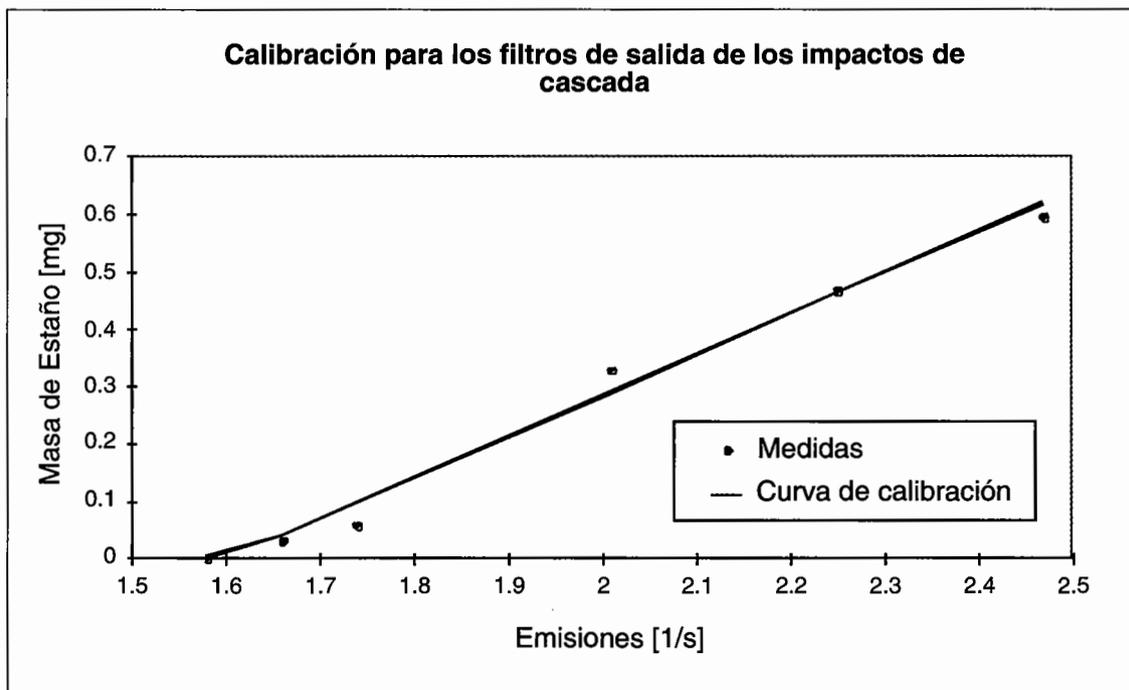
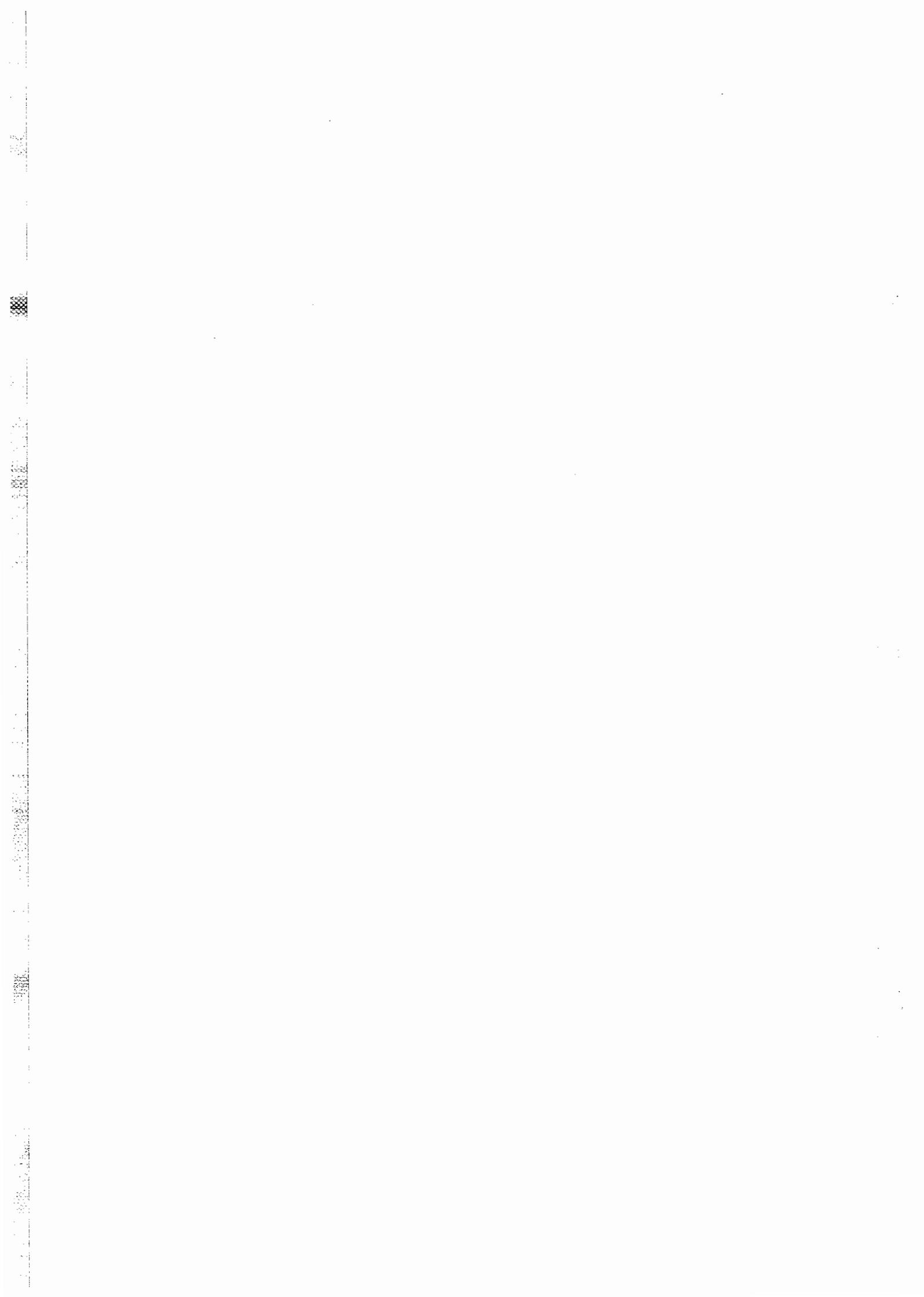


Figura 15. Curva de calibración para el XRF, para partículas de SnO_2 .



V. Conclusiones

V. Conclusiones

El Proyecto STORM (1991 - 1998) ha significado un gran paso adelante para el estudio de los fenómenos de transporte de partículas compuestas por productos de fisión dentro del sistema primario en condiciones de accidente severo en una central nuclear de agua ligera. Hasta la fecha es la única instalación experimental donde se han reproducido condiciones representativas de este tipo de accidentes, obteniéndose una base de datos valiosa para el estudio de los mecanismos de formación, transporte, deposición y resuspensión de partículas líquidas y sólidas. Dicha base de datos es esencial para poder mejorar los actuales códigos de cálculo para el estudio del término fuente, carentes hasta la fecha de una herramienta completa en lo que al estudio de la resuspensión se refiere.

Las principales conclusiones extraídas, a la hora de evaluar globalmente los experimentos de deposición y resuspensión llevados a cabo en el STORM podrían resumirse en los siguientes puntos:

- La deposición de partículas puede ser un importante sumidero en el cálculo del término fuente (retención de hasta un 10% de la masa de partículas inyectadas en 5 metros de tubería recta con un diámetro interno de 63 milímetros).
- El mecanismo de deposición más importante es la deposición termoforética, causante de hasta el 95% de la retención de aerosoles en condiciones favorables (para gradientes de temperatura cercanos a los 100 grados Celsius entre las paredes interiores y exteriores de la tubería de prueba).
- La resuspensión puede ser un importante término fuente en los instantes posteriores al accidente severo. Hasta un 80% de la masa depositada se resuspendería en caso de alcanzar números de Reynolds cercanos a 150.000.
- La presencia de partículas líquidas modifica radicalmente los procesos de deposición y de resuspensión. Al aumentar el coeficiente de adherencia a las paredes de las tuberías, incrementa muy significativamente la deposición e inhibe casi por completo la resuspensión para números de Reynolds representativos.

La aportación del STORM ha sido muy significativa. Gracias a los datos experimentales distribuidos y a la realización de los ejercicios comparativos de códigos (STORM Benchmarks) en 1994 y del Ejercicio Estándar Internacional (ISP-40) en 1998, se han desarrollado dos nuevos modelos para el cálculo de la deposición (MARIE en la Universidad de Karlsruhe y DeNIRO en el CCR de Ispra), dos para la resuspensión (ETH de la Universidad de Zurich y CÆSAR fruto de

la colaboración CCR-Ispra, CIEMAT y CSN) y, finalmente, se han mejorado una gran cantidad de códigos como SOPHAEROS, ECART, VICTORIA y ART.

El Consejo de Seguridad Nuclear ha sido desde el nacimiento del STORM una parte muy activa en el proyecto, contribuyendo directamente en parte de sus tareas e indirectamente, mediante la financiación del contrato de colaboración CCI-CIEMAT. Los mayores logros obtenidos gracias a esta colaboración son el desarrollo del código de cálculo para la resuspensión CÆSAR, la coordinación del Ejercicio Estándar Internacional (ISP-40) y el montaje e inicio de las medidas del Laboratorio para el análisis post-test de los experimentos STORM.

Parte de la instalación STORM y, en particular, su avanzado sistema de generación de partículas y los novedosos equipos de medida, ha sido empleada para realizar la serie experimental del proyecto CONGA, para el estudio del efecto de la deposición de partículas en el rendimiento del intercambio térmico en un generador de vapor.

Acabados sendos proyectos, se han reciclado prácticamente todos los equipos para montar dos nuevas instalaciones: VELA (Vehicle Emission Laboratory) donde se estudiarán los gases de escape de turismos y WIND (Waste Industry Incenerator) donde se probarán nuevas técnicas para la incineración de residuos industriales.

Publicaciones y participaciones en conferencias

- [1] A. de los Reyes, J. A. Capitão, E. Hontañón, G. De Santi y A. Alonso. *Experimental Results and Modelling of Aerosol Transport in the STORM Project*. Ponencia invitada a la XXII Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Santander, octubre 1996.
- [2] A. de los Reyes, E. Hontañón y J. A. Capitão. *The CÆSAR Computer Code for Particle Resuspension. Turbulent Flow in the Near-Wall Region*. Informe presentado en el "2nd Meeting of the STORM Scientific Committee". JRC-Ispra (Italia), enero 1997.
- [3] A. de los Reyes y J. A. Capitão. *ISP 40. STORM Facility Data Book*. Nota técnica N.º I.97.61, "Institute for Systems, Informatics and Safety". JRC-Ispra (Italia), abril 1997.
- [4] A. de los Reyes, R. Arias y E. Hontañón. *Elastic Deformation and Particle Adhesion*. Informe presentado en el "3rd Meeting of the STORM Scientific Committee". JRC-Ispra (Italia), junio 1997.
- [5] A. de los Reyes. *Estudio de los Mecanismos de Transporte de Aerosoles en el Sistema Primario de Centrales Nucleares de Agua Ligera en Caso de Accidente Grave*. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, julio 1997.
- [6] A. de los Reyes, E. Hontañón, R. Arias y J. A. Capitão. *The CÆSAR Model for Particle Resuspension in Turbulent Flows*. Informe presentado en la "European Aerosol Conference". Hamburgo (Alemania), septiembre 1997. *Journal of Aerosol Science* (1987), Vol. 28, pp. S327 - S328.
- [7] A. de los Reyes, R. Arias y E. Hontañón. *Spanish Contribution to the STORM Project on Aerosol Resuspension in Severe Accidents*. Informe presentado en la XXIII Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. La Coruña, octubre 1997.
- [8] A. de los Reyes. *Colaboración del CSN en el Proyecto STORM*. Informe presentado en las II Jornadas de I+D 1997 del Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid, diciembre 1997.
- [9] A. de los Reyes, E. Hontañón y J.A. Capitão. *OECD/CSNI/ISP 40: CÆSAR Calculations for Resuspension*. Informe presentado en el "2nd ISP 40 Workshop". Ispra (Italia), marzo 1998.

- [10] E. Hontañón, A. de los Reyes, J. Areia Capitaó, R. Arias, J. López Jiménez y G. de Santi. *Modelling Aerosol Deposition and Resuspension in Turbulent Pipe Flows*. Informe presentado en la Conferencia "Top Safe' 98". Valencia, abril 1998.
- [11] A. de los Reyes, E. Hontañón, R. Monti y J. A. Capitão. *Aerosol Resuspension in Turbulent Flows*. Informe presentado en la "Third International Conference on Multiphase Flow". Lyon (Francia), junio 1998.
- [12] A. de los Reyes, J. A. Capitão y J. Royen. *ISP-40: Preliminary Conclusions from an International Standard Problem on Aerosol Deposition and Resuspension*. Informe presentado en el "Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols". Colonia (Alemania), junio 1998.
- [13] E. Hontañón, A. de los Reyes y J. A. Capitão. *Effect of Roughness on Particle Adhesion to Surfaces*. Informe presentado en el "Third OECD Specialist Meeting on Nuclear Aerosols. Colonia (Alemania), junio 1998.
- [14] A. de los Reyes y J. A. Capitão. *ISP-40. Preliminary Conclusions*. Informe presentado en el "3rd ISP 40 Workshop". Ispra (Italia), junio 1998.
- [15] A. de los Reyes y J. A. Capitão. *International Standard Problem no. 40. Aerosol Deposition and Resuspension*. Informe enviado al "OECD/Principal Working Group 4". Julio 1998.
- [16] A. de los Reyes, E. Hontañón y J.A. Capitão. *The CAESAR Code for Aerosol Resuspension in Turbulent Pipe Flows. Assesment against the STORM Experiments*. Publicación enviada al Journal of Aerosol Science. Septiembre 1998.