

EVALUACIÓN DE CRITICIDAD PARA EL BULTO DE TRANSPORTE DALMA 25

C. Bastida, O. Novara, M. Flores

Comisión Nacional de Energía Atómica

RESUMEN

El DALMA 25 es un bulto de transporte desarrollado por CNEA para transportar soluciones acuosas de uranio con hasta un 20% de enriquecimiento en U-235. El mismo cuenta con certificación vigente por parte de la autoridad regulatoria.

En el marco del correspondiente proceso de licenciamiento del diseño de dicho bulto, se evaluaron las condiciones de seguridad por criticidad empleando un código de cálculo basado en el método de Montecarlo, tanto en condiciones normales de transporte como en condiciones hipotéticas de accidente.

Si bien el bulto fue diseñado para el transporte de soluciones de uranio de masas y concentraciones seguras como unidad aislada, en la determinación del índice de seguridad con respecto a la criticidad (ISC) para una remesa se consideraron distintas condiciones de apilamiento y de concentración de uranio de las soluciones a fin de determinar las más desfavorables.

La modelización geométrica del bulto en condiciones de accidente se basó en los resultados experimentales de los ensayos de apilamiento dinámico efectuados sobre prototipos durante la campaña de ensayos demostrativos de la capacidad de resistencia del bulto. Para el cálculo en tales condiciones se supuso además reflexión ideal e inmersión completa de la remesa.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño DALMA 25 fue concebido para transportar en la vía pública soluciones acuosas de uranio de enriquecimiento menor al 20% en isótopo U-235. Fue desarrollado por la CNEA para atender la necesidad de remitir el uranio enriquecido recuperado de los descartes de producción de placas combustibles tipo MTR para su reutilización. El DALMA 25 es un bulto del Tipo A para material fisionable que cuenta con certificación vigente por parte de la autoridad competente, siendo su identificación de diseño RA/0102/AF-96. En el marco del correspondiente proceso de licenciamiento del diseño de dicho bulto, se evaluó la reactividad en diversos escenarios empleando un código de cálculo basado en el método de Montecarlo.

Si bien el bulto fue diseñado para el transporte de soluciones de uranio de masas y concentraciones seguras como unidad aislada, en la determinación del índice de seguridad con respecto a la criticidad (ISC) para una remesa (un conjunto de bultos iguales en transporte) se evaluaron distintas formas de apilamiento ordenado, tanto en condiciones normales de transporte como en condiciones hipotéticas de accidente, incluyendo en el análisis concentraciones de uranio superiores a la concentración segura, a fin de determinar las condiciones más desfavorables para calcular la reactividad del conjunto.

Consecuentemente, se calculó la cantidad máxima de unidades de este bulto en un conjunto ordenado que fuese subcrítico en el escenario más desfavorable. Para las condiciones normales de transporte, dicha cantidad se iguala a la magnitud “5N”, mientras que aquella que se determina en condiciones hipotéticas de accidente se iguala a “2N”. Finalmente, se determina el ISC con la fórmula $50/N$, utilizándose para ello el menor valor de “N” hallado [1].

Por tratarse el diseño DALMA 25 de un bulto liviano (menor de 500 kg) con densidad aparente menor a 1000 kg/m³, y a los efectos de calcular la cantidad “2N”, el grupo diseñador decidió agregar ensayos de aplastamiento dinámico al plan de ensayos mecánicos prescriptos para demostrar que el diseño resiste las condiciones de transporte y basarse en sus resultados para establecer el confinamiento del bulto y modelizar su geometría en condiciones de accidente.

2. CARACTERISTICAS GENERALES DEL BULTO

El diseño DALMA 25 fue concebido para transportar soluciones acuosas de nitrato de uranio o de otras sales de uranio de enriquecimiento menor al 20% en isótopo U-235 en un bidón de polietileno de alta densidad de capacidad nominal 25 litros.

El bidón con el contenido radiactivo se ubica dentro de un tambor cilíndrico de acero inoxidable. Dentro del mismo, se distribuyen piezas que centran al bidón y lo inmovilizan. En el espacio anular entre el tambor y el bidón se distribuye un material especial para absorber derrames con capacidad suficiente para absorber el doble del volumen máximo de contenido líquido. El tambor y todos sus componentes internos conforman el sistema de contención, cuyas partes móviles son la tapa del tambor, su sello (de material elastómero) y tornillos para generar el cierre.

Debido a que el bulto debe soportar cargas dinámicas de la magnitud de las producidas en los ensayos complementarios para bultos del Tipo A diseñados para contener líquidos (caída libre de 9 m), el embalaje se completa con un sistema de limitación de impacto que consiste en un envase también cilíndrico con su correspondiente tapa, ambos de poliestireno expandido de alta densidad (material absorbente de la energía mecánica), de modo tal que el tambor con su carga queda protegido adentro de aquél. Este sistema limitador de impacto (cuerpo y tapa) está recubierto por chapa fina de acero inoxidable (Figura 1).

El confinamiento básico del bulto está dado por la masa y la concentración de isótopo U-235 en el contenido radiactivo líquido a transportar siendo ambos parámetros intrínsecamente seguros para uranio con enriquecimiento menor o igual al 20%. Además, el diseño incluye como sistema de confinamiento a todos los componentes del embalaje.

Las dimensiones generales del embalaje completo son: altura 990 mm y diámetro 668 mm. El peso del bulto (incluida la carga líquida) oscila los 142 kg.

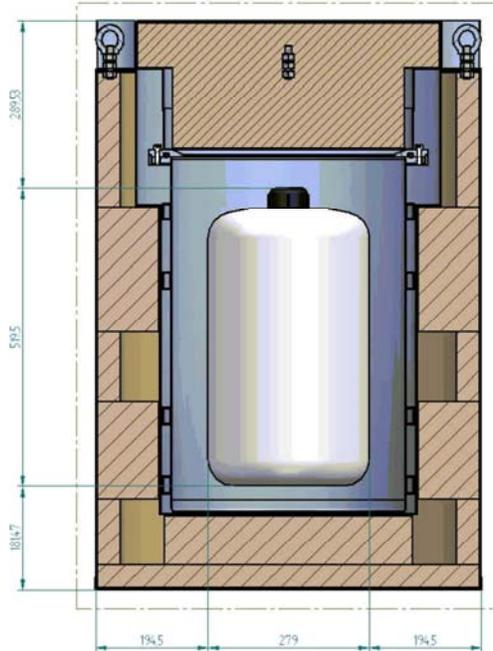


Figura 1.- Corte esquemático del bulto DALMA 25

3. MODELIZACION DE LA UNIDAD AISLADA

Para armar la entrada de datos constructivos y geométricos del bulto en el código de cálculo, se procedió a realizar la descripción del bulto de acuerdo a la Figura 2, consistiendo las partes en: 1- Nitrato de uranilo. 2- Espacio libre. 3- Bidón de Polietileno de alta densidad. 4- Espacio libre. 5- Tambor de acero inoxidable. 6- Poliestireno de alta densidad. 7- SCubierta exterior de acero inoxidable

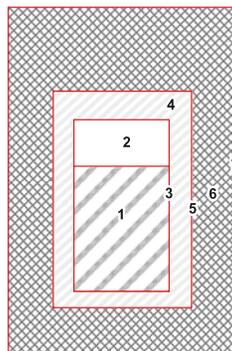


Figura 2: Modelización de materiales y geometría del bulto DALMA 25.

En el caso de los conjuntos ordenados en condiciones normales de transporte, como las distorsiones y deformaciones producidas en los prototipos ensayados en tales condiciones resultaron despreciables en comparación con el tamaño original, para la modelización se consideró la geometría y dimensiones de los bultos intactos (Figura 1).

En cambio, para el análisis de reactividad de los conjuntos ordenados en condiciones de accidente, se modelizó geoméricamente y dimensionalmente el bulto en base a los resultados de los ensayos de aplastamiento dinámico realizados a los prototipos (caída de una placa de acero de 500 kg desde 9 m de altura sobre el bulto). Se efectuaron dos ensayos de este tipo, uno con el prototipo ubicado sobre el blanco en posición horizontal (Figura 3) y el segundo en posición vertical.



Figura 3: (Izquierda) Prototipo DALMA 25 posicionado horizontalmente para el primer ensayo de aplastamiento dinámico. (Derecha) Momento del impacto de la placa maciza.

Si bien se evaluó la reactividad a partir las deformaciones propias de cada ensayo por separado, en el modelo utilizado finalmente incluyó la combinación de las deformaciones sufridas por las unidades en ambos ensayos (Figura 4), ya que resultaba más conservativo.

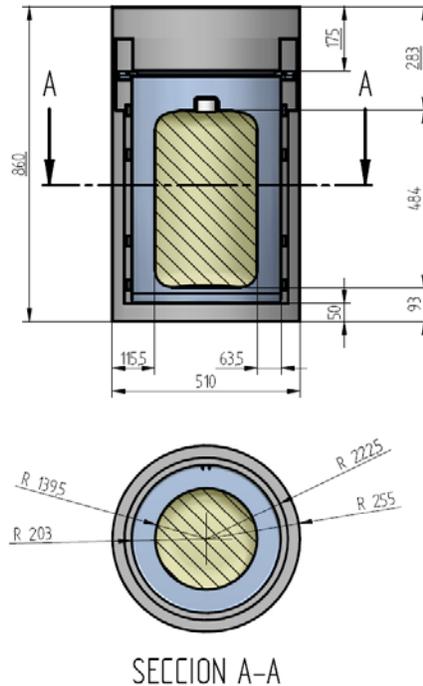


Figura 4: Esquema dimensional del modelo que corresponde a la suma de ambos impactos de aplastamiento dinámico.

4. VARIABLES ANALIZADAS EN LOS CALCULOS DE REACTIVIDAD

A los efectos de establecer las condiciones más desfavorables desde el punto de vista de la seguridad nuclear para el cálculo de reactividad de los conjuntos ordenados, se analizaron las variables descritas a continuación:

4.1. Efectos de la forma de distribución de los bultos

Primeramente, se comparó las reactividades de un arreglo de 5 bultos por lado y 4 en altura (en total 100 bultos), habiéndose observado que la distribución hexagonal era más restrictiva que la cuadrangular.

Entonces, se continuó el estudio considerando un arreglo de unidades en contacto conformando celdas hexagonales de siete unidades (una en el centro y seis alrededor). Si la evaluación permitía aumentar la cantidad de bultos, se procedía a establecer una capa de superpuesta a la primera y, de seguir siendo posible, una tercer capa y así capas sucesivas, buscando que la geometría del arreglo tendiese a la forma cúbica. En caso de más de una capa, se evaluaron 2 disposiciones: en primer lugar se evaluó que las unidades de bulto no quedaran alineadas verticalmente, sino que cada unidad de la capa superior apoyara centrada

sobre tres unidades inferiores. En segundo lugar, se evaluó una distribución en capas con bultos alineados axialmente (Figura 5).

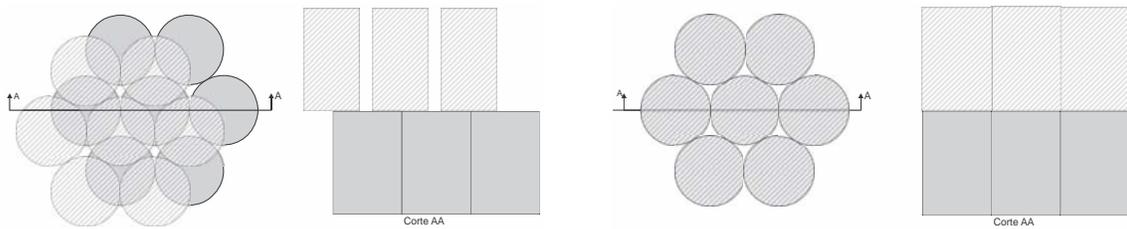


Figura 5: (Izquierda) Bultos desplazados verticalmente entre capas. (Derecha) Bultos alineados verticalmente entre capas.

Se observó que la variación de la reactividad entre dichas distribuciones no era significativa y se reducía al incrementar la cantidad de bultos en el arreglo (Figura 6). Entonces, se pudo mantener sin riesgo la distribución de capas alineadas verticalmente en los cálculos, con lo que se facilitó la descripción de las configuraciones de mayor cantidad de bultos recurriendo a la opción “lattice” del código de cálculo utilizado. Esta herramienta permite describir arreglos de distribución hexagonal y cada caso se configuró con una envolvente cúbica.

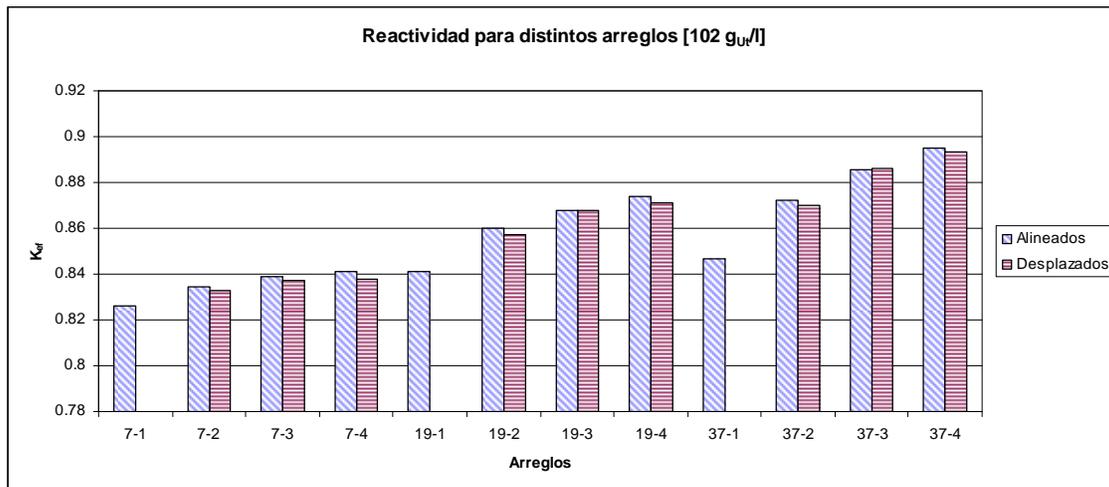


Figura6: Comparación de reactividad de las distribuciones analizadas

4.2. Efectos de la concentración de la solución de uranio en la reactividad

Ye se mencionó que el control de la criticidad en la unidad aislada del DALMA 25 está dado por limitación de la concentración, la cual no puede exceder el valor seguro de 51 gU/l para U enriquecido al 20%. No obstante, se decidió eliminar dicho parámetro de control de la criticidad para poder evaluar la reactividad del conjunto controlada solamente por las distancias relativas de las unidades. Para ello, se analizó la variación de la reactividad de dicho conjunto con el aumento de la concentración de uranio contenido (considerando 25 l de solución en cada bulto) para determinar la concentración correspondiente a la moderación óptima del sistema. La evaluación se hizo para un arreglo hexagonal de 7 bultos con 4 niveles, 28 bultos. Los resultados se presentan en la Figura 7.

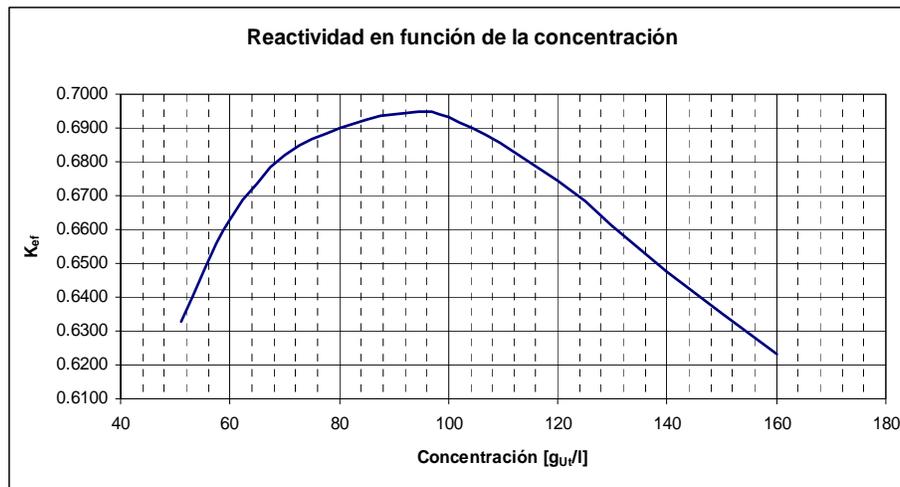


Figura 7: Reactividad en función de la concentración de la solución acuosa de U al 20% para un arreglo de 7x4 bultos

Más aún, al duplicar la concentración segura, se aprecia en la curva Figura 7 que la variación del K_{ef} con respecto a la moderación óptima no es importante y a partir de ello, los cálculos de reactividad se efectuaron con la concentración de “doble carga” (102 g/l U_{tot}). Junto con los cambios en la concentración, se consideró también en la entrada de datos el cambio de la densidad de la solución. Basado en datos experimentales, la densidad de la solución acuosa de nitrato de uranilo es cercana a 1,2 g/cm³ para la concentración de “doble carga”.

4.3. Reflexión y moderación

En cuanto a la reflexión y moderación, se evaluaron escenarios con reflexión total, sin reflexión y con inundación (intersticios entre bultos llenos de agua). El caso más conservativo se obtuvo de considerar que el espacio entre los bultos se encontraba vacío (sin inundación), combinado con una reflexión total dada por una capa de 30 cm de agua envolviendo a todo el conjunto ordenado.

5. DETERMINACION DEL INDICE DE SEGURIDAD POR CRITICIDAD

Como ya se indicó, el cálculo del ISC del diseño DALMA 25 requirió determinar la cantidad máxima de unidades de bulto en un conjunto ordenado que fuese subcrítico en el escenario más desfavorable a partir de las variables discutidas precedentemente. Para las condiciones normales de transporte, dicha cantidad se igualó a la magnitud “5N”, mientras que para las condiciones hipotéticas de accidente cantidad resultante se igualó a “2N”. Finalmente, se determinó el ISC con la fórmula $50/N$, utilizándose para ello el menor valor de “N” hallado.

5.1. Determinación del número “N” de conjuntos ordenados en condiciones normales de transporte

La geometría de la unidad aislada y la descripción de los materiales que lo conforman considerados en este caso los indicados en la Figura 2, con las dimensiones propias de diseño. Para hallar la cantidad de bultos “5N”, los cálculos de reactividad se hicieron considerando la celda hexagonal y alineación axial de los bultos de las sucesivas capas. Dichos cálculos se hicieron con la concentración “doble carga” de 102 g/l Utot. La condición de contorno más restrictiva fue la reflexión total de 30 cm de espesor de agua sin inundación. En la Figura 8 se presenta la evolución del K_{ef} con la cantidad de bultos presentes en la distribución hexagonal con envolvente cúbica.

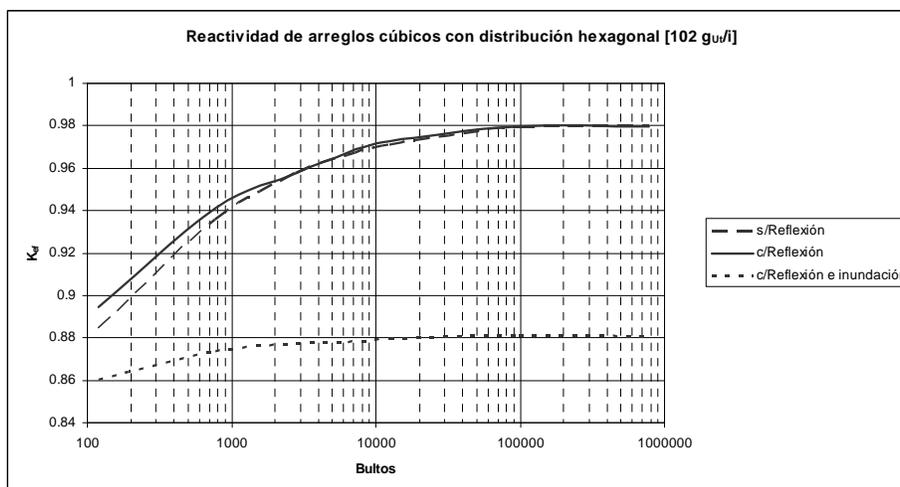


Figura 8: Curvas de K_{ef} en función de la cantidad de bultos en condiciones normales de transporte.

Tal como se refleja en el gráfico, se observó que al incrementarse la cantidad de bultos, la reactividad tendía asintóticamente a valores subcríticos y los valores de “N” podían ser indefinidamente grandes.

A los efectos de reflejar el nivel de confiabilidad de los valores calculados, para un valor de corte de K_{ef} : 0.9578 se obtuvo un σ : 0.0007 y un rango de varianza del 99% comprendido entre 0.95601 a 0.95949. En este caso el valor “5N” fue de 2805.

5.2. Determinación del número “N” de conjuntos ordenados en condiciones hipotéticas de accidente

La geometría de la unidad aislada y la descripción de los materiales que lo conforman considerados en este caso fueron similares a los indicados en la Figura 2, pero aplicando el esquema dimensional de la Figura 4, correspondiente a la modelización resultante de los ensayos de aplastamiento dinámico. Cabe aclarar que las variaciones dimensionales tuvieron lugar solamente en el sistema limitador de impactos, de acuerdo a la evidencia experimental.

Para hallar la cantidad de bultos “2N”, se estableció como criterio de corte que el K_{ef} calculado no debía ser mayor que 0,95. Los cálculos de reactividad se hicieron considerando la celda hexagonal y alineación axial de los bultos de las sucesivas capas. Dichos cálculos se hicieron con la concentración “doble carga” de 102 g/l Utot. En este caso también se dio que la condición de contorno más restrictiva fue la reflexión total de 30 cm de espesor de agua sin inundación. En la Figura 9 se presenta la evolución del K_{ef} con la cantidad de bultos presentes en la distribución hexagonal con envolvente cúbica.

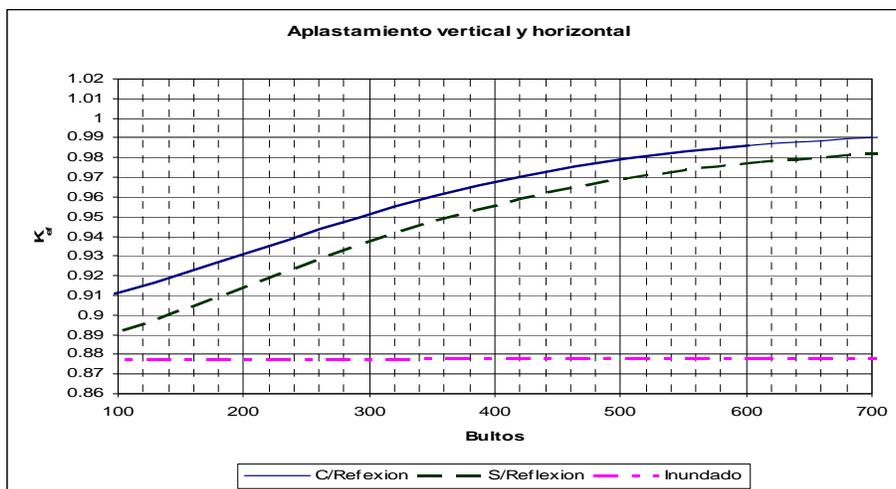


Figura 9: Curvas de K_{ef} en función de la cantidad de bultos en condiciones hipotéticas de accidente.

De acuerdo al criterio establecido de cortar a un $K_{ef} \leq 0,95$, se seleccionó como valor “2N” la cantidad de 290 bultos. Por lo tanto, el valor N para la condición hipotética de accidente considerada fue 145.

5.3. Selección del valor del ISC

En la evaluación correspondiente a condiciones normales de transporte, se observó que al incrementarse la cantidad de bultos, la reactividad tiende asintóticamente a valores subcríticos y los valores de “N” podían ser indefinidamente grandes. Por lo tanto, se tomó el valor de “N” de 145, deducido de las condiciones hipotéticas de accidente, para determinar el ISC. $ISC = 50/145 = 0,34$

6. CONCLUSIONES

Para modelizar el bulto y desarrollar escenarios que permitiesen asegurar por cálculo la subcriticidad de una remesa numerosa de bultos DALMA 25 en condiciones altamente conservativas, se tuvieron en cuenta varios márgenes de seguridad.

Uno de ellos fue descartar el control administrativo de concentración segura en la solución de uranio a transportar y suponer que, debido a un grueso error, dicha concentración era el doble (cercana a la moderación óptima). Con ello, si bien la unidad aislada sigue siendo segura por masa de uranio (pues el volumen de solución está limitado por la capacidad de bidón que lo contiene), la subcriticidad de una remesa sólo pasa a ser controlada por las distancias relativas entre unidades de bulto, la cual a su vez están moduladas por las deformaciones producidas en el conjunto debido a situaciones de accidente.

En este sentido, es lógicamente aceptable asumir que el mantenimiento de un conjunto ordenado luego de un accidente severo es un escenario conservativo. A ello se suma que se eligió modelar el bulto dañado en base a los ensayos de aplastamiento dinámico que en principio no son requeridos para certificar bultos del Tipo A para líquidos, pero que resultan más adecuados para evaluar la capacidad de resistencia de un bulto liviano a las condiciones hipotéticas de accidente. Tal modelización redujo la cantidad de bultos subcríticos en un factor cercano a 10, para un corte de Kef de aproximadamente 0.95. Otro valor adicional de dichos ensayos es que se demostró, más allá de las importantes deformaciones registradas, que todos los componentes del bulto se mantienen unidos y que, por lo tanto, es aceptable asumir que todos ellos forman parte del confinamiento de la solución de uranio enriquecido a transportar, tal como se supuso en los cálculos de reactividad de los conjuntos.

Por último, debe destacarse que todos los cálculos se hicieron con el mismo nivel de varianza, del orden de las milésimas.

7. REFERENCIAS

1. AUTORIDAD REGULATORIA NUCLEAR, “Transporte de Materiales Radiactivos” Norma AR 10.16.1 Revisión 2, Rep. Argentina (2012).