Resum

El projecte que es presenta té com a principal objectiu el disseny del blindatge necessari d'un accelerador compacte d'electrons de 12 MeV de tipus Microtró de Pista (*Race-Track Microtron en anglès, acrònim* RTM) que està en procés de construcció per l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

S'estudien dos sistemes de blindatge, ubicats tots dos en una sala de l'edifici K2M del Parc UPC del Campus Nord. En el primer cas, s'analitza un blindatge estructural que consisteix en recobriments addicionals de formigó a les parets existents a la sala. El segon sistema està basat en un blindatge local format per una cambra cilíndrica de plom que envolta l'accelerador.

El càlcul de blindatge es realitza mitjançant PENELOPE, un codi de simulació per Monte Carlo del transport d'electrons, fotons i positrons en la matèria.

Com a fonts de radiació es consideren principalment la radiació secundària produïda per la interacció del feix primari amb una copa de Faraday en les proves inicials de posada a punt de l'equip i la radiació de fuites originada en la unitat principal de l'accelerador degut a les pèrdues originades per interacció del feix amb elements interns del Microtró. En les simulacions amb PENELOPE també es contempla la radiació terciària produïda per possibles dispersions en les parets secundàries.

Cal destacar, que donada la complexitat del Microtró, la simulació amb PENELOPE és l'únic mètode per determinar la radiació de fuita de forma realista.

Es presenten els resultats obtinguts mitjançant gràfics que relacionen taxa de dosi en funció de l'espessor. A partir d'aquests s'obtenen les primeres capes decimorreductores i la capa decimorreductora d'equilibri (CDRs i la CDR_{eq}). També es mostren els mapes de distribució de taxa de dosi per espessors i situacions d'interès. Utilitzant aquests resultats es calcula l'espessor de material per als dos esquemes de blindatge indicats que proporcionen la protecció radiològica suficient en el període de proves i la posta en marxa del Microtró.

Finalment, els resultats es comparen amb estimacions realitzades en base a la Norma DIN 6847 part 2.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

1. GLOSSARI 5

2. PREFACI 7

2.1. Origen del projecte 7

2.2. Requeriments previs 7

3. INTRODUCCIÓ 9

3.1. Objectius del projecte 9

3.2. Abast del projecte 9

4. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA 11

4.1. Projecte Microtró 11

4.1.1. Descripció del Microtró 11

4.1.2. Ubicació 13

4.1.3. Configuracions de blindatge proposades 14

4.2. Fenòmens d'interacció de la radiació amb la matèria 14

4.2.1. Interacció dels electrons amb la matèria 15

4.2.2. Interacció de la radiació electromagnètica amb la matèria 15

4.3. Eines de càlcul de blindatge utilitzades 16

4.3.1. Introducció 16

4.3.2. PENELOPE, codi de simulació per Monte Carlo 18

4.3.3. Norma DIN 6847 part 2 27

5. SIMULACIONS MONTE CARLO AMB PENELOPE 31

5.1. Model simplificat del Microtró pel càlcul de la radiació de fuita 32

5.2. Modelització i metodologia d'estudi amb PENELOPE 34

5.2.1. Creació del primer PSF 35

5.2.2. Creació del segon PSF 37

5.2.3. Càlcul de la taxa de dosi 38

5.3. Estudi de la taxa de dosi a les parets sense blindatge 39

5.3.1. Gràfics de distribució de taxa de dosi 40

5.3.2. Interpretació dels gràfics 43

5.3.3. Conclusions 44

5.4. Càlcul del blindatge amb recobriments de formigó 45
5.4.1. Càlcul a les parets laterals 45
5.4.2. Càlcul al sostre 49
5.5. Càlcul del blindatge local de plom 52
5.5.1. Càlcul al sostre 53
5.5.2. Càlcul a les parets laterals 56
5.6. Proposta final de blindatge amb PENELOPE 58

6. RESOLUCIÓ AMB LA NORMA DIN 59
6.1. Càlcul del blindatge amb recobriments de formigó 59
6.2. Càlcul del blindatge local de plom 62

7. COMPARATIVA PENELOPE-NORMA DIN 65

8. PRESSUPOST 69

9. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL 71

CONCLUSIONS 73

AGRAÏMENTS 75

BIBLIOGRAFIA 77
Referències bibliogràfiques 77
Bibliografia complementària 78

ANNEXES 79
Índex d'Annexes 79

ANNEX A. ARXIUS D'ENTRADA EN PENELOPE 81

ANNEX B. MAPES DE DISTRIBUCIÓ DE TAXA DE DOSI 121

1. Glossari

RTM: *Race Track Microtron,* (Microtró de Pista)

PENELOPE: *PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons*

CDRs: Capes decimorreductores

CDR_{eq}: Capa decimorreductora d'equilibri

CDR_1: Primera capa decimorreductora

DIN: *Deutsches Institut für Normung*

NCRP: *National Council on Radiation Protection and Measurements*

PSF: *Phase Space File* (Espai de Fase)

RD: Real Decret

H*(10): Taxa de l'equivalent de dosi ambiental

RX: Raigs X

B2: Blanc 2

B3: Blanc 3

U.M: Unitat de mesura

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Aquest estudi s'emmarca dins del Projecte Microtró, portat a terme pel programa de recerca de Física Nuclear i Acceleradors de l'INTE junt amb altres entitats col·laboradores, en el qual es desenvolupa el disseny i la construcció d'un Microtró de Pista amb futures aplicacions en radioteràpia intraoperatòria.

L'autorització de qualsevol instal·lació radioactiva implica entre altres qüestions el plantejament d'un estudi de seguretat i disseny del blindatge corresponent, per tal d'assegurar que les persones i el medi ambient no pateixin els efectes provocats per les radiacions ionitzants més enllà dels límits tolerables. En aquest context s'ha de justificar que l'ús de les radiacions ionitzant suposen un benefici net per la societat, s'ha de complir la normativa vigent respecte als límits de dosi legalment establerts (RD 793/2001) i al mateix temps aplicar el criteri ALARA (*As low as reasonably achievable*) per tal que l'impacte radiològic de la instal·lació estigui degudament optimitzat i minimitzat.

El projecte que es presenta, neix de la necessitat d'obtenir dades de les emissions radioactives que produirà el Microtró i el conseqüent càlcul de blindatge necessari per el compliment de la normativa de protecció radiològica vigent.

2.2. Requeriments previs

La realització d'aquest projecte requereix coneixements previs de física nuclear i de protecció radiològica. També és important tenir nocions bàsiques de la tecnologia dels acceleradors de partícules.

D'altra banda, es necessita tenir a l'abast les eines utilitzades pel disseny de blindatges com les Normes i codis de simulació, així com un cert domini en la seva posada en pràctica.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

S'estudien dos sistemes de blindatge, ubicats tots dos en una sala de l'edifici K2M del Parc UPC del Campus Nord. En el primer cas, s'analitza un blindatge estructural consistent en recobriments addicionals de formigó a les parets existents a la sala. El segon sistema consisteix en un blindatge local format per una cambra cilíndrica de plom que envolta l'accelerador. Es pretén realitzar el càlcul de blindatge del Microtró per cadascuna de les dues configuracions proposades.

Degut a la complexitat del disseny del Microtró en quant a components i la seva disposició, és extremadament complex arribar a una estimació realista mitjançant càlculs analítics de la distribució de taxa de dosi produïda. També resulta una dificultat afegida trobar dades empíriques de magnituds com el factor d'acumulació en el rang d'energies i espessors del cas d'estudi.

S'espera doncs obtenir resultats per mitjà del codi de simulació PENELOPE, que permet estudiar els efectes del transport d'electrons, fotons i positrons en la matèria a partir d'un model geomètric amb estructures complexes i comparar-los amb estimacions obtingudes amb la Norma DIN 6847 part 2, que és el document habitualment aplicat per al càlcul de blindatges d'acceleradors d'ús mèdic.

Aquests resultats poden servir d'orientació de cara a les especificacions tècniques del Microtró i al perceptiu estudi de seguretat per obtenir la corresponent autorització de funcionament.

3.2. Abast del projecte

En aquest projecte s'han considerat com a fonts de radiació principalment la radiació secundària produïda per la interacció del feix primari amb una copa de Faraday utilitzada per l'estudi del feix de sortida en les proves inicials de posada a punt de l'equip, i la radiació de fuites originada en la unitat principal de l'accelerador degut a les pèrdues per interacció del feix amb elements interns del Microtró. En les simulacions amb PENELOPE també es contempla la radiació terciària produïda per possibles dispersions en les parets secundàries.

Es desenvolupa un model del capçal del Microtró per a la radiació de fuites que, encara que sigui simplificat, té en compte tots els components més importants en quant a l'efecte autoblindant.

Les diferents components de radiació s'han tractat per separat i no s'ha tingut en compte l'efecte autoblindant del capçal del Microtró en l'estudi de la radiació secundària, per tant, els resultats obtinguts donen una estimació conservadora en aquest cas.

4. Plantejament del problema

4.1. Projecte Microtró

El Projecte Microtró té com a finalitat el disseny i construcció d'un accelerador compacte d'electrons del tipus Microtró de Pista (*Race-Track Microtron* en anglès, acrònim RTM) de 12 MeV d'energia màxima que està en procés de construcció per l'INTE de la UPC amb la col·laboració de CIEMAT, *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics* (SINP) de la Universitat Estatal de Moscú, centres mèdics i companyies industrials espanyoles [1].

4.1.1. Descripció del Microtró

La unitat principal del capçal de l'accelerador consta d'un injector d'electrons (1), una estructura d'acceleració de banda C (2), dos imants de retorn (3) i (4), un imant quadrupol focalitzador (5) i quatre imants d'extracció (6). Aquests elements es troben fixats en una plataforma rígida de suport dins d'una cambra de buit [1]. L'extracció del feix es pot realitzar per qualsevol de les últimes quatre òrbites mitjançant l'imant d'extracció corresponent, tal com s'indica en la Figura 4.1

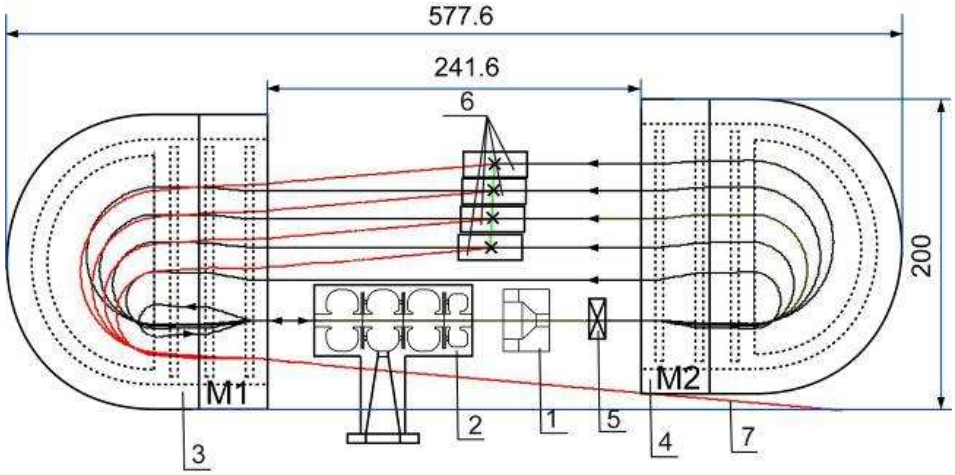

Figura 4.1. Esquema de la unitat principal del RTM

Inicialment, el feix d'electrons injectat és accelerat per l'estructura d'acceleració. En arribar al primer imant de retorn (imant corbador de 180º) (M1), retorna de nou a la cavitat acceleradora per acció del camp magnètic degudament ajustat (òrbita 0) de M1. En passar per

segona vegada a través d'aquesta, el feix adquireix suficient energia (4 MeV) per començar a recircular. En la primera òrbita, el feix té doncs una energia de 4 MeV. Dins del RTM es defineixen un total de cinc òrbites en les quals, el feix va adquirint 2 MeV d'energia durant el seu pas per l'estructura d'acceleració. Els imants d'extracció desvien el feix des d'una de les quatre últimes òrbites [2] i el dirigeixen cap a la finestra de sortida de la cambra de buit (7), d'aquesta manera l'energia del feix de sortida pot ser 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV o 12 MeV.

Els càlculs es realitzaran en base a l'energia màxima de sortida (12 MeV) per ser el cas més restrictiu.

A continuació es detallen els valors dels paràmetres principals [2] segons l'objectiu d'estudi i una imatge en 3D de l'interior del capçal del RTM [1].

Paràmetre	**Valor**
Tipus de partícules	Electrons
Energia d'extracció	6, 8, 10, 12 MeV
Intensitat nominal de sortida	1 μA
Diàmetre del feix a la sortida	4 mm
Temps de funcionament	2000 h/any
Dimensions externes del RTM	670x250x210 mm

Taula 4.1. Paràmetres del RTM

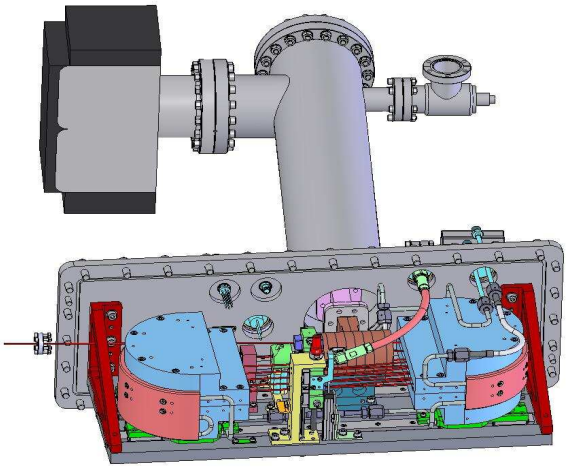

Figura 4.2. Model en 3D de l'interior del capçal del RTM

4.1.2. Ubicació

La sala de l'edifici K2M del Campus Nord de la UPC és una de les propostes d'emplaçament pel RTM i la que s'ha considerat en aquest estudi. Existeixen ubicacions alternatives en sales d'hospitals i edificis destinats a recerca, motiu pel qual part de l'estudi s'ha enfocat de manera que els resultats puguin ser extrapolats a diferents configuracions.

El feix primari estarà enfocat perpendicularment cap el terra, per tant aquest és la barrera primària i les altres parets són les barreres secundàries. Així doncs, la sala de l'edifici K2M es modela amb un paral·lelepípede rectangular, com s'observa a la Figura 4.3, que consta de:

- **La barrera primària**

- El terra. Aquesta barrera no es té en compte en aquest estudi, atès que es preveu que la sala del Microtró estarà situada en la planta més baixa de l'edifici, on el terra absorbirà tota la radiació. Cal mencionar que càlculs simples donen gruixos impracticables de l'orde de 4 metres de formigó, amb el què es conclou que durant la fase de proves i de posada en marxa, el Microtró inevitablement s'ubicarà en sales de la planta més baixa de l'edifici que correspongui.

- **Barreres secundàries**

- Quatre parets (A, B, C, D), que protegeixen zones no controlades o de lliure accés. En aquestes zones es preveu el pas lliure de membres del públic, per tant, la dosi efectiva no podrà superar 1 mSv/any. Tanmateix són passadissos o magatzems de baixa ocupació i per tant es suposa un factor d'ocupació (fracció de temps durant el qual es preveu que les persones ocupin el lloc a protegir) per les sales adjacents a aquestes parets de 0.1.

- El sostre. Es preveu la ubicació de la sala de control del Microtró en el pis immediatament superior. Segons la legislació vigent es permet una dosi efectiva superior a 1 mSv/any per treballadors exposats i per tant es podria considerar en el càlcul i a efectes d'optimització una dosi superior, de fins a 6 mSv/any; tot i així, en l'estudi que es presenta es limita la dosi efectiva a 1 mSv/any. Es suposa un factor d'ocupació unitari per la sala ubicada al sostre.

Es considera la màquina situada al centre de la sala. Aquest coincideix amb l'origen de coordenades, el qual es troba a nivell del terra. En l'estudi s'utilitzarà el sistema de referència que s'indica en la Figura 4.3 i el punt d'entrada del feix incident a la copa de Faraday coincideix amb les coordenades (0, 0, 9) cm.

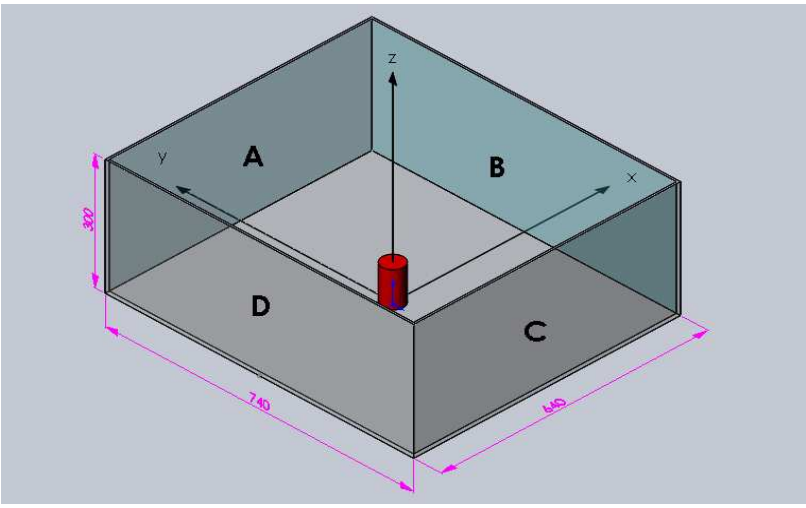

Figura 4.3. Sala d'operació del Microtró. Cotes indicades en cm.

4.1.3. Configuracions de blindatge proposades

Es calcula el blindatge per dos casos diferents considerant la sala de l'edifici K2M com emplaçament de tots dos.

En el primer cas, el blindatge s'entén com a parets addicionals de formigó que revesteixen les parets de la sala. En el segon, l'atenuant és un blindatge local de plom de forma cilíndrica que envolta el RTM. La taxa de dosi es determina a la banda exterior de les parets de la sala en tots dos casos i el pla de detecció es manté fix. En el cas concret de blindatge amb formigó doncs, les parets addicionals s'adhereixen en direcció cap a l'interior de la sala.

No es tenen en compte les parets existents a la sala com a element atenuant ja que estan construïdes amb totxos buits per dins en gran part de la seva extensió.

4.2. Fenòmens d'interacció de la radiació amb la matèria

La radiació té la capacitat de penetrar en la matèria i interaccionar amb els àtoms que la constitueixen. Com a conseqüència d'aquestes interaccions, la radiació perd energia o pateix un canvi de trajectòria [3].

L'objectiu del blindatge és forçar aquesta pèrdua d'energia per tal que no s'arribi al límit de dosi en el lloc a protegir.

El fet que els fotons que constitueixen la radiació electromagnètica no tinguin càrrega ni massa fa que els mecanismes per els quals interaccionen siguin diferents al de les partícules carregades [4].

4.2.1. Interacció dels electrons amb la matèria

Les partícules carregades interaccionen amb el medi mitjançant col·lisions elàstiques, si es conserva l'energia cinètica total, o inelàstiques, en cas contrari. Aquestes interaccions tenen lloc tant amb els electrons atòmics com amb el nucli.

En el cas de les col·lisions inelàstiques, l'àtom absorbeix l'energia cinètica de la partícula incident quedant en estat excitat o ionitzat. La ionització es produeix quan l'energia cedida és suficient per arrencar un electró de l'àtom i l'excitació quan aquesta energia només permet a l'electró ocupar un nivell superior [3].

Un altre mecanisme de pèrdua d'energia és per emissió de radiació de frenada o *bremsstrahlung*. Aquest es produeix quan una partícula carregada lliure pateix una forta acceleració com a conseqüència de la seva interacció amb el camp electrostàtic dels àtoms o nuclis. La intensitat de la radiació emesa és proporcional al quadrat del nombre atòmic del blanc i creix linealment amb l'energia de la partícula [4].

La prevalència d'un mecanisme de pèrdua d'energia depèn del tipus de partícula incident, de la seva energia i de la naturalesa del medi material. La ionització i excitació és important per les partícules carregades pesants i els electrons de baixa energia mentre que per electrons d'energies elevades (a partir d'1 MeV) la pèrdua d'energia es dóna principalment per *bremsstrahlung* [3].

4.2.2. Interacció de la radiació electromagnètica amb la matèria

El fet que els fotons siguin elèctricament neutres i sense massa, fa que la secció eficaç d'interacció sigui més petita que en el cas de les interaccions de les partícules carregades, és a dir, tenen un abast major [4].

Es detallen els tres mecanismes principals d'interacció [3]. La importància relativa de cadascun d'ells depèn de l'energia del fotó incident i del nombre atòmic del medi.

- **Efecte fotoelèctric**: Es produeix quan el fotó incident és absorbit per l'àtom amb el qual interacciona i la seva energia és utilitzada per expulsar un electró d'una capa interna. És un procediment d'interacció important per fotons de baixa energia i

materials constituïts per àtoms d'elevat nombre atòmic. Es dóna especialment per fotons d'energies inferiors a 0.5 MeV.

- **Efecte Compton:** Es tracta també d'una dispersió elàstica entre un fotó i un electró lliure o feblement lligat a l'àtom. El fotó incident cedeix part de la seva energia a l'electró, de manera que surt del sistema com a fotó difós amb una energia inferior a la que tenia inicialment. L'efecte Compton augmenta amb el nombre atòmic del material i disminueix amb l'energia del fotó. En concret, és important per fotons d'energies entre 0.5 i 10 MeV.

- **Producció d'una parella electró-positró:** La producció de parelles consisteix en la transformació d'un fotó en un electró i un positró. Aquest fenomen es dona si el fotó es troba en el camp electromagnètic d'una partícula carregada. L'electró produït interacciona amb la matèria perdent progressivament la seva energia i el positró s'anihila amb un electró del medi. D'aquesta anihilació en resulten dos fotons que es propaguen en la mateixa direcció i sentits oposats amb una energia de 0.511 MeV (equivalent energètic de la massa de l'electró). La creació de parelles és més probable en el camp produït per un nucli que en el produït per un electró. Les energies llindars són 1.022 MeV i 2.044 MeV respectivament. Aquest mecanisme d'interacció és predominant per energies del fotó superiors a 10 MeV.

4.3. Eines de càlcul de blindatge utilitzades

4.3.1. Introducció

L'estudi de problemes relacionats amb el transport de radiació es pot realitzar aplicant de manera analítica l'equació del transport de Boltzmann. Al tractar-se d'una equació íntegro-diferencial, la seva solució analítica resulta complicada amb geometries i camps de radiació complexes.

De l'equació del transport, es dedueix una expressió que relaciona el flux total de fotons obtingut en un punt determinat amb el flux teòric que arribaria si el feix inicial no patís cap interacció. Aquesta relació s'anomena factor d'acumulació i depèn de la geometria i composició del material absorbent així com de l'energia dels fotons [3]. El flux real detectat està composat per fotons del feix inicials, pels dispersats pel material de blindatge o per

fotons produïts en reaccions secundàries com l'anihilació d'electró i positró en la producció de parelles.

El concepte de factor d'acumulació s'utilitza habitualment en el càlcul de blindatges i el seu valor s'obté normalment mitjançant relacions semiempíriques o taules de valors limitades a un rang d'energies, espessor i tipus de material blindant. Aquest aspecte dificulta l'estudi del blindatge del Microtró mitjançant un càlcul semiempíric degut a l'elevada energia dels electrons emesos i als grans espessors de blindatge previstos, de manera que l'ús del concepte de factor d'acumulació implicaria realitzar extrapolacions en molts casos.

Com a alternativa als factors d'acumulació, en la majoria de Normes disponibles que detallen un procediment de càlcul de blindatges per a acceleradors, com la Norma DIN 6847 [5], NCRP 144 [6] o ICRP 33 [7], s'utilitzen els conceptes de CDR (capa decimorreductora) i CHR (capa hemirreductora) que són els espessors necessaris per reduir la taxa de dosi un factor 10 i un factor 2 respectivament.

En condicions ideals, el factor de transmissió T (S) d'un cert espessor de blindatge (S), que és la fracció entre la taxa de dosi desitjada i la taxa de dosi inicial, s'expressa com [6]:

$$T(S) = 10^{-S/CDR} = 2^{-S/CHR} \qquad \text{Equació 4.1}$$

L'Equació 4.1 assumeix que cada increment del mateix espessor redueix la taxa de dosi un factor constant. En alguns casos es produeixen desviacions significatives del comportament ideal i majoritàriament a les capes més properes a la font, principalment degut a que en presència de camps de radiació polienergètics, les radiacions de més baixa energia són atenuades més ràpidament que les d'alta energia [6].

Així, es pot definir la CDR_1 com la primera capa que redueix un factor de 10 la taxa de dosi i la CDR_{eq} que correspòn a la CDR quan s'assoleix l'equilibri, és a dir, quan la magnitud d'espessor necessari per reduir un factor 10 la taxa de dosi es manté constant.

La norma NCRP 144, que és una de les més extenses en bibliografia en quant al valor d'aquestes capes, proposa que pel càlcul es tingui en compte tant la CDR_1 com la CDR_{eq} segons l'Equació 4.2 [6].

$$S = CDR_1 + (n-1)CDR_{eq} \qquad \text{Equació 4.2}$$

La *n* i la S fan referència al número de capes decimorreductores i espessor necessari respectivament.

A nivell pràctic, la Norma NCRP 144 recomana com a valor de CDR_{eq} l'espessor que redueix un factor $e^{2,713}$ la taxa de dosi.

Per altra banda, avui dia també s'utilitzen codis de simulació que apliquen el mètode de Monte Carlo, el qual permet trobar solucions que coincideixen amb els resultats que s'obtindrien amb una rigorosa solució de l'equació del transport [8]. En aquest projecte la simulació Monte Carlo permetrà determinar entre altres dades, els valors de les corresponents CDRs mitjançant gràfics que relacionen taxa de dosi (H*(10)) en funció de l'espessor de blindatge. També s'utilitzaran aquests per obtenir el gruix total per mitjà de l'extrapolació de la corba, que equival a l'Equació 4.2 generalitzada al nombre de CDRs conegudes. En els casos en el quals el temps de computació ho permeti, els càlculs basats en CDRs es compararan amb simulacions en les que es contempla el càlcul de taxa de dosi amb el gruix de blindatge total considerat. La simulació també permetrà determinar de manera realista la radiació de fuites generada pel Microtró.

Hi ha diferents codis de simulació per Monte Carlo del transport de radiació i en aquest estudi s'utilitza PENELOPE, gratuït i de codi obert. Tal com s'ha comentat, també s'utilitzen Normes que detallen un procediment de càlcul com la Norma DIN 6847 [5], NCRP 144 [6] o ICRP 33 [7]. A continuació es detallen les eines utilitzades per aquest projecte, PENELOPE i Norma DIN 6847 part 2, triant-se aquesta darrera norma com a referència per a la comparació degut a que és una de les normes de més àmplia utilització a nivell europeu.

4.3.2. PENELOPE, codi de simulació per Monte Carlo

El mètode de Monte Carlo és un mètode numèric basat en l'ús de nombres aleatoris i probabilitats estadístiques molt utilitzat avui dia per resoldre problemes físics i matemàtics complexos que no es poden portar a terme amb mètodes convencionals.

En el problema concret del transport de radiació, es simula mitjançant un model d'interacció les histories de les partícules, des de que neixen fins que es produeix una interacció on la partícula canvia de direcció, perd energia o produeix partícules secundàries.

El model d'interacció consta de funcions de densitat de probabilitat de variables aleatòries que caracteritzen la trajectòria d'una partícula [8]:

- Camí lliure mig.
- Tipus d'interacció.
- Pèrdua d'energia i desviació angular.
- Estat inicial de les partícules secundàries emeses.

Aquestes funcions es determinen a partir de les seccions eficaces d'interacció de les partícules amb el medi.

Degut a la naturalesa estadística d'aquest mètode, tots els resultats queden afectats per incerteses. Aquestes es poden reduir mitjançant un augment de la mostra, la qual cosa pot provocar un augment de temps computacional inabordable, o bé utilitzant tècniques de reducció de variança o reduint la complicitat del problema aprofitant simetries o procediments que t'ofereix el programa [8].

El *software* utilitzat en aquest estudi és el codi de simulació PENELOPE, conjunt de subrutines creades a través d'un programa principal, i que per al seu funcionament requereix de l'usuari la preparació de tres arxius on es detalla el problema:

- Arxiu principal d'entrada de dades i comandes (*input*).
- Arxiu on es defineix la geometria.
- Arxius amb les propietats dels materials que composen la geometria.

A l'arxiu d'entrada principal s'indiquen les característiques pròpies del problema, es fa la crida a la geometria i s'especifiquen els arxius de material que s'han de considerar. També s'inclouen els paràmetres de la simulació i les comandes necessàries per obtenir els arxius de sortida (*outputs*).

PENELOPE permet utilitzar tres programes principals genèrics: *Penslab* (per geometries quadrangulars), *pencyl* (per geometries cilíndriques) i *penmain* (per geometries quàdriques genèriques). El programa utilitzat en aquest estudi és el *penmain*.

La geometria la construeix l'usuari definint cossos (volums) delimitats per superfícies quàdriques i les propietats dels materials es generen mitjançant el subprograma MATERIAL.

4.3.2.1 Estructura de l'*input* amb *penmain*

Per la realització del càlcul de blindatge s'han requerit set blocs de comandes d'un total de deu que ofereix el programa. Aquests set, amb les comandes utilitzades, són els que es detallen a continuació.

- **Definició de la font**

Tal com s'observa en l'Exemple d'*input* 4.1, en aquest bloc s'especifica el tipus de partícula incident, la seva energia, el centre i dimensions del feix, els angles polar i azimutal d'Euler i l'angle d'obertura del con respectivament.

En el cas d'estudi la font considerada és una font superficial monoenergètica emissora d'electrons on la direcció del feix inicial es monodireccional dirigit cap al terra.

```
       >>>>>>>> Source definition.

SKPAR  1     [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 12e6     [Initial energy [eV] (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 9                       [Coordinates of the source [cm]]
SBOX   0.3545 0.3545 0.0             [Source box dimensions [cm]]
SCONE  180 0 0                      [Conical beam; angles in deg]
.
```

Exemple d'*input* 4.1. Definició de la font

- **Crida a l'espai de fase (PSF)**

Addicionalment a utilitzar una font definida segons es detalla en l'apartat anterior, el codi permet utilitzar com a font de radiació la informació continguda en un fitxer anomenat fitxer d'espai de fase o PSF (*phase space file*) generat prèviament per l'usuari. Aquesta utilitat permet dividir simulacions complexes en diverses parts i optimitzar en molts casos el temps de càlcul.

El PSF és un arxiu on es va guardant l'estat de les partícules que entren en un detector prèviament definit com a part de la geometria. Entre d'altres paràmetres es registra el tipus de partícula, la seva energia, les coordenades de posició i la direcció de vol.

En aquesta part de l'*input*, es fa la crida al PSF per tal que el programa el consideri com a font inicial, s'indica quantes vegades es vol simular cada partícula del PSF (*splitting number*) i l'energia màxima que poden tenir aquestes per entrar en la simulació (veure Exemple d'*input* 4.2).

Quan es fa aquesta crida, el PSF té prioritat sobre qualsevol altre definició de font, i per tant, les altres definicions no es tenen en compte.

Amb l'opció d'*splitting* activada, si una partícula amb un pes inicial de 1 es llença 10 vegades (*IPSPLI*=10), la contribució de cadascuna d'aquestes 10 històries serà de 1/10. Per no esbiaixar el resultat, la incertesa es calcula tenint en compte aquest fet.

```
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)

IPSFN  PSF1blanc3.dat                          [input psf name]
IPSPLI 5                              [NSPLIT, splitting number]
EPMAX  4e6           [Maximum energy of particle in the psf [eV]]
       .
```

Exemple d'*input* 4.2. Crida al PSF

- **Materials i paràmetres locals de simulació**

En aquest apartat es fa la crida als arxius amb la informació de les propietats dels materials necessària per la simulació. Per cada material, s'especifiquen els paràmetres locals de simulació tal com s'observa en l'Exemple d'*input* 4.3.

S'introdueixen tants materials com s'hagin definit en la geometria del cas d'estudi i es col·loquen en el mateix ordre que en aquesta.

Els paràmetres de la simulació són [8]:

- EABS (1:3): Són les energies locals d'absorció per electrons, fotons i positrons respectivament. És el valor mínim d'energia que han de tenir les partícules per continuar la seva trajectòria i no ser absorbides.
- C_1: Determina el recorregut lliure mig entre col·lisions elàstiques fortes.
- C_2: Indica la màxima fracció d'energia mitja perduda en una interacció forta.
- W_{cc}: És l'energia de tall per electrons i positrons a partir de la qual la simulació és més detallada.
- W_{cr}: És l'energia de tall per fotons.

Els factors C_1 i C_2 poden adoptar valors entre [0, 0.2]. Com més petit sigui el valor més detallada serà la simulació per cada partícula. Per reduir el temps de simulació, s'ha utilitzat el valor de 0.2, atès que aquest límit superior ha estat fixat suficientment petit com per no esbiaixar els resultats.

Els valors de W_{cc} i W_{cr} s'han variat segons l'estudi. Tot i així no superen el valor d'un centè de l'energia primària, valor recomanat com a segur pel manual.

S'han utilitzat diferents valors de EABS (1:3) per a cadascun dels casos. En general les energies d'absorció s'han fixat altes per electrons i positrons i baixes per fotons.

```
>>>>>>>> Material data and simulation parameters.

MFNAME plom.mat                    [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 1e5 3e4 1e5 0.2 0.2 1e4 1e4  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR;[eV]]
MFNAME Al.mat                      [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 12e4 3e4 12e3 0.2 0.2 1e4 1e4[EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR;[eV]]
       .
```

Exemple *d'input* 4.3. Crida als materials i definició dels paràmetres de simulació

- **Geometria**

En aquest bloc s'inclou l'arxiu que conté la geometria.

En el cas de cossos molt estrets, és recomanable fer un control del recorregut lliure mig d'electrons i positrons per tal de forçar un número d'interaccions mínim i tenir suficients dades que comptabilitzar. S'ha utilitzat el valor recomanat pel manual del programa, que és un dècim del gruix del cos en qüestió.

En l'Exemple d'*input* 4.4, s'observa la crida al fitxer que conté la geometria, el cos objecte de control de recorregut i el valor de control que en aquest cas és el corresponent a un cos de 1 cm de gruix.

```
       >>>>>>>> Geometry definition file.

GEOMFN psf_lateral.geo             [Geometry file, up to 20 chars]
DSMAX  4 0.1            [KB, maximum step length in body KB [cm]]
       .
```

Exemple d'*input* 4.4. Crida al fitxer geomètric i especificació de control de recorregut

- **Definició dels detectors d'impacte**

Tal com s'ha comentat, es poden definir detectors d'impacte per crear espais de fase (PSF) o per obtenir fitxers amb l'espectre energètic en cossos concrets. L'*output* de l'espectre energètic es genera directament amb la definició del detector, en canvi, el PSF només es crea si es dóna l'ordre corresponent. El detector ha de ser un o més cossos de la geometria definida prèviament i tant l'espectre energètic com el PSF (si es fa) estaran creats en aquests cossos.

Tal com s'observa en l'Exemple d'*input* 4.5, en la primera línia de comandes s'especifica l'interval d'energies cobertes pel detector i el nombre de divisions d'aquesta, si es vol o no crear un espai de fase (IPSF=1, o IPSF=0 respectivament) i un paràmetre que fa referència a com afecta el detector a la trajectòria de les partícules (IDCUT).

- IDCUT=0: Es para la trajectòria de la partícula quan entra al detector. Aquest és el valor que s'ha utilitzat en tots els casos perquè, degut a la geometria, en cas contrari es comptabilitzarien efectes més d'una vegada.
- IDCUT=1: La presència del detector no afecta al recorregut de les partícules.
- IDCUT=2: La presència del detector no afecta i es crea un altre *output* amb el flux de les partícules que entren al detector integrades en el seu volum.

En la segona línia, s'indica quin cos de la geometria actua com a detector. Es poden definir diferents detectors assignant una línia de comandes per cadascun.

Es pot definir quin tipus de partícules es vol detectar. En el cas d'estudi s'han detectat tot els tipus de partícules possibles que és el cas contemplat per defecte si no s'inclou cap comanda.

```
        >>>>>>>> Impact detector.

IMPDET 0.0 12e6 20 1 0   [E-window [eV], no. of bins, IPSF, IDCUT]
IDBODY 4                     [Active body; one line for each body]
                                  .
```

Exemple d'*input* 4.5. Definició del detector d'impacte

- **Distribució de dosi absorbida**

Es poden obtenir mapes de distribucions de dosi absorbida en un paral·lelepípede indicant les coordenades dels seus vèrtex i les divisions per cada eix, tal com s'observa en l'Exemple d'*input* 4.6.

```
         >>>>>>>> Dose distribution.

GRIDX  -105 105     [X coordinates of the enclosure vertices [cm]]
GRIDY  -104.5 105.5 [Y coordinates of the enclosure vertices [cm]]
GRIDZ  183.75 184.75[Z coordinates of the enclosure vertices [cm]]
GRIDBN  7 7 1                                   [Numbers of bins]
```

Exemple d'*input* 4.6. Obtenció de mapes de dsitribució de dosi

- **Propietats globals de simulació**

El programa ens permet crear un arxiu (dump2.dmp) on es resumeix la simulació una vegada finalitzada. Aquest arxiu es pot utilitzar per començar una altra simulació en el punt on es va deixar utilitzant la comanda RESUME.

Si l'opció DUMPTO (dump2.dmp) està activada, els resultats es van actualitzant als *outputs* cada un cert temps, especificat en la comanda DUMPP en segons.

S'indiquen dues arrels per tal de generar els nombres aleatoris. Aquests s'han de canviar si es volen obtenir simulacions estadísticament independents.

El NSIMSH i TIME són dos criteris per aturar la simulació. El primer fa referència al nombre de partícules primàries simulades i, el segon, al temps de simulació. La simulació finalitza segons el criteri més restrictiu.

Tots aquests paràmetres explicats s'observen en l'Exemple d'*input* 4.7.

```
>>>>>>>> Job properties

RESUME dump1.dmp            [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump2.dmp               [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60                                [Dumping period, in sec]
.

RSEED  50 50                [Seeds of the random-number generator]
NSIMSH 2e99                  [Desired number of simulated showers]
TIME   1.2e6                     [Allotted simulation time, in sec]
.
```

Exemple d'*input* 4.7. Paràmetres globals de la simulació

4.3.2.2 Creació de la geometria

Les geometries utilitzades en aquest estudi es poden crear a través de plans i cilindres, per tant, s'explica com han estat creades aquestes superfícies en concret.

Les superfícies quàdriques es poden definir segons l'equació reduïda [8],

$$F_r(x,y,z) = I_1x^2 + I_2y^2 + I_3z^2 + I_4z + I_5 = 0 \qquad \text{Equació 4.3}$$

o segons l'equació implícita [8],

$$F(x,y,z) = A_{xx}x^2 + A_{xy}xy + A_{xz}xz + A_{yy}y^2 + A_{yz}yz + A_{zz}z^2 + A_x x + A_y y + A_z z + A_0 = 0$$

Equació. 4.4

L'esquema de creació de la geometria és diferent segons quina de les equacions s'utilitza per definir-la. L'elecció del tipus d'equació es fa en base a la simplicitat de definició.

Tal com mostren els Exemples de definició de geometria 4.1 i 4.2, s'associa un número a cada superfície, s'indiquen uns índex i una sèrie de paràmetres que defineixen expansions, translacions i rotacions en centímetres.

- **Forma reduïda**

Per crear cilindres i plans on el vector normal és l'eix z, com z = 0 o z = k, sent k una constant qualsevol, s'ha definit la superfície seguint l'esquema de la forma reduïda.

Els índex corresponen als coeficients de l'Equació 4.3: $(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5)$

Per exemple, la superfície d'un cilindre d'eix coincident amb l'eix z es defineix segons l'equació: $x^2 + y^2 - 1 = 0$. Per tant els índex són $(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5) = (1,1,0,0,-1)$

A continuació s'indica quan sigui convenient les expansions al llarg dels eixos (`X-SCALE`,`Y-SCALE`,`Z-SCALE`), rotacions definides per els angles d'Euler (`OMEGA`, `THETA`, `PHI`) i translacions (`X-SHIFT` , `Y-SHIFT` , `Z-SHIFT`).

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=183.25
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 183.2500000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=(-1.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Exemple de definició de geometria 4.1. Forma reduïda

- **Forma implícita.**

S'ha utilitzat aquesta opció per crear els plans d'equacions del tipus $x = k$ i $y = k$, sent k una constant qualsevol, per simplicitat. Utilitzar la forma reduïda en aquests casos suposa indicar constantment rotacions i translacions.

Al posar tots els índex nuls, s'està indicant al programa la utilització de l'esquema implícit.

A continuació s'indiquen quan correspongui els valors corresponents als coeficients de l'equació implícita (`AXX, AXY, AXZ, AYY, AYZ, AZZ, AX, AY, AZ, A0`), les rotacions (`OMEGA, THETA, PHI`) i translacions (`X-SHIFT , Y-SHIFT , Z-SHIFT`).

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) X=110.8, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
A0=(-110.8000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7) Y=-113.35, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
A0=( 113.3500000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Exemple de definició de geometria 4.2 Forma implícita

- **Construcció de cossos.**

Un cos és definit com un volum d'un material concret limitat per superfícies quàdriques. La definició s'ha de realitzar en ordre creixent, de manera que els volums més interns s'han de definir els primers, ja que la seva superfície pot delimitar altres cossos.

En l'Exemple de definició de geometria 4.3 s'observa com es defineix un volum. En primer lloc s'associa un numero a cada cos o mòdul, s'indica de quin material està constituït i a continuació s'especifiquen les superfícies que el formen (en el cas dels mòduls també s'indiquen els cossos).

Els mòduls (MODULE) són cossos mare que engloben altres creats prèviament.

Cal indicar quina cara de la seva superfície (interna o externa) delimita el cos. Això s'expressa amb els SIDE POINTERS,

- (+1): superfície interior d'un cilindre o cara del pla orientada cap la part positiva de l'eix.

- (-1): superfície exterior d'un cilindre o cara del pla orientada cap a la part negativa de l'eix.

Un volum buit s'indica amb un 0 en el material.

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   0)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Exemple de definició de geometria 4.3. Construcció de cossos

4.3.2.3 Creació de l'arxiu amb les propietats dels materials

L'arxiu de dades dels materials es creen amb un programa auxiliar (MATERIAL) que extreu les propietats físiques i d'interacció atòmica del material d'una base de dades interna. Es disposa de l'arxiu *pdcompos.p08* amb 280 materials (elements, compostos i barreges), del qual es pot obtenir la informació directament introduint un número identificatiu de cada material. En cas contrari, existeix l'opció de crear l'arxiu introduint les dades de composició estequiomètrica o de percentatge en pes i densitat del material que es necessita [8].

4.3.3. Norma DIN 6847 part 2

La Norma DIN 6847 part 2 defineix un procediment de càlcul àmpliament utilitzat en el disseny de blindatges d'instal·lacions mèdiques amb acceleradors d'electrons d'energies compreses entre 1-50 MeV.

La fórmula general especificada en dita Norma per calcular l'espessor de blindatge necessari contra la component de radiació 'i' que actua sobre el lloc a protegir és [5]:

$$S_i = {Z_i}/{\rho} \cdot Log_{10}\left(\frac{WTUK_i q_i}{H}\right) \qquad \text{Equació 4.5}$$

Els factors presents a la fórmula són:

- **Espessor (S):** És el gruix de material blindant necessari per complir la Normativa.

- **Capa decimorreductora (CDR) (Z/ρ):** És el gruix necessari per reduir un factor 10 la taxa de dosi i depèn del tipus de radiació així com del material de blindatge. Z és un paràmetre que s'obté seguint el procediment indicat a la Norma i ρ fa referència a la densitat del material de blindatge.

- **Factor de ponderació o qualitat (q):** Aquest factor té en compte l'efectivitat biològica de la radiació depenent de la seva naturalesa.

Tant els electrons com els fotons tenen un factor de ponderació unitari, per tant, 1 mGy equival a 1 mSv. En el càlcul de la càrrega de treball (W) ja es té en compte aquest factor, de tal manera que aquesta queda expressada directament amb les unitats d'interès [mSv/setm].

- **Càrrega de treball (W)**: És el producte de la quantitat d'irradiacions unitàries que es duen a terme per setmana i el promig de la dosi impartida.

A priori no es sap el nombre d'irradiacions que es realitzaran a la setmana però si que s'estima un temps de funcionament de 40 h/setm.

Tenint en compte el flux d'electrons i la funció resposta (R_H) [4] que representa la dosi por unitat de fluencia d'electrons d'una energia donada, es pot determinar la càrrega de treball del microtró tal com indiquen les Equacions 4.6.

En el cas d'electrons de 12 MeV → $R_H = 1{,}66 \cdot 10^{-3} \left[\frac{mSv/h}{elect/cm^2 \cdot s} \right]$

$$1 \cdot 10^{-6} \frac{C}{s} \cdot \frac{1e}{1{,}60217 \cdot 10^{-19} C} = 6{,}24 \cdot 10^{12} \frac{e}{s}$$

$$6{,}24 \cdot 10^{12} \frac{e}{s} \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-3} \frac{mSv \cdot cm^2 \cdot s}{e \cdot h} \cdot \frac{1}{0{,}125 cm^2} = 8{,}28 \cdot 10^{10} \frac{mSv}{h}$$

$$8{,}28 \cdot 10^{10} \frac{mSv}{h} \cdot \frac{40h}{1setm} = 3{,}3 \cdot 10^{12} \frac{mSv}{setm}$$

Per tant, $W = 3{,}3 \cdot 10^{12} \frac{mSv}{setm}$ Equacions 4.6

- **Factor d'ús (U):** Quantifica la fracció de temps durant el qual el feix de radiació està dirigit al punt d'interès.
- **Factor d'ocupació (T):** Fa referència a la fracció de temps que es preveu que les persones ocupin el lloc a protegir.
- **Factor de reducció (K):** Contempla la reducció de dosi deguda a la distància entre la font i el lloc a protegir.
- **Taxa de dosi esperada (H):** És la taxa de dosi desitjada. En aquest estudi el límit és d'1 mSv/any.

La norma contempla principalment, des del punt de vista del tipus de components de radiació que caldrà blindar:

- Feix primari.
- Radiació secundària generada per la interacció del feix primari en el punt d'impacte.
- Radiació de fuites.
- Radiació terciària, produïda pels xocs de qualsevol de les altres components de radiació amb les parets. Com que la sala s'ha de blindar en totes les seves parets contra radiació secundària i de fuites, aquesta component només té interès en el cas que el blindatge contempli l'ús de laberints i sigui necessari calcular la radiació que arribi a l'entrada. D'acord amb el plantejament del problema no es contempla incloure laberint i per tant, no es calcularà específicament.

Els valors que depenen del tipus de radiació considerada són el paràmetre Z i el factor de reducció (K). A continuació es detalla com s'obtenen aquests valors per la radiació secundària i la radiació de fuites que són les components objecte d'estudi.

- **Radiació secundària:**
  - Z s'obté de la Taula 2 de la referència [5]
  - K es calcula com [5]:

$$K = \frac{10^{-2} \cdot Ke \cdot F_n}{a_s^{\,2}} \qquad \text{Equació 4.7}$$

On, segons la Norma:

- 10^{-2} és l'angle de dispersió fixat per la Norma.

- K_e és un factor per dimensionar blindatges contra radiació de frenada generada fora de l'emissor en el cas del servei amb electrons. Per electrons de 12 MeV que interaccionen amb alumini (material de la copa de Faraday) K_e=6.5 $\cdot 10^{-3}$ i s'obté de la Figura 2 present en la referència [5].
- F_n és la màxima secció del feix útil (0.125 cm).
- a_s és la distància entre el lloc a protegir i on es produeix l'impacte del feix útil.

▪ **Radiació de fuites:**

- Z s'extreu de la Figura 1 de la referència [5]
- K es calcula com [5]:

$$K = \frac{D_0}{D_r} \qquad \text{Equació. 4.8}$$

On segons la Norma,

- D_0 és la màxima taxa de dosi que produeix la radiació de fuites sobre el lloc a protegir.
- D_r és la màxima taxa de dosi produïda per la radiació del feix primari.

Tal com ja s'ha comentat anteriorment, a priori, l'únic mètode per determinar de manera realista i suficientment precisa la radiació de fuites és amb simulació Monte Carlo, per tant, per poder aplicar la norma, pel valor de D_0 s'utilitzaran els resultats obtinguts mitjançant simulacions amb PENELOPE.

Quan es considera un conjunt format per varies fonts de radiació com és el cas del present projecte (secundària i fuites), la Norma DIN proposa determinar el gruix necessari per blindar cadascuna de les components i estudiar-ne el reforçament en funció de la diferència d'espessors obtinguts. Si aquesta diferència és més gran que la CDR més restrictiva, no es necessita reforç, en cas contrari, es segueix el criteri presentat a la Taula 4.2 [5].

Diferència d'espessors (D)	**Reforç**
D < 0.3·CDR	S_{max} + 0.3·CDR
0.3·CDR < D < 0.6·CDR	S_{max} + 0.2·CDR
0.6 · CDR < D < 1·CDR	S_{max} + 0.1·CDR

Taula 4.2. Reforç de blindatge davant l'actuació d'un conjunt de components de radiació

La CDR que es té en compte en tot el procés és la CDR_{eq} més elevada.

5. Simulacions Monte Carlo amb PENELOPE

Els objectius de la simulació amb el codi PENELOPE són resumidament els següents:

1- Determinar la dosi de radiació a 1 m del Microtró, en particular a 1 m de les parets exteriors de la cambra de buit, deguda tant a radiació secundària com a radiació de fuites.

   Aquestes dades permeten conèixer l'impacte radiològic de l'equip i poden facilitar, en cas necessari, determinar el blindatge en dependències diferents de les plantejades en aquest projecte. Així mateix, són imprescindibles per a l'estudi de seguretat del Microtró en vistes a la seva autorització, ja que permetran la realització de càlculs independents.

2- Obtenir la taxa de dosi de radiació sense elements de blindatge en els punts a protegir, definits per la cara exterior de les parets de la sala considerada, com a punt de partida per als càlculs posteriors.

3- Obtenir dades suficients per representar la taxa de dosi en els punts a protegir en funció del gruix de blindatge considerat tant per radiació secundària com per radiació de fuites.

   En el cas de la radiació secundària, en aquest projecte s'indicarà sempre com a radiació secundària + terciària ja que en les simulacions sempre s'ha tingut en compte la presència de totes les parets laterals i sostre de la sala, amb un gruix mínim de 6 cm de formigó que garanteixi la generació de radiació terciària. En el cas de la radiació de fuites no s'ha considerat necessari el càlcul de radiació terciària.

4- Determinar les corresponents capes decimorreductores.

5- Realitzar el càlcul de l'espessor de blindatge necessari en funció de la taxa de dosi desitjada en el punt a protegir:

   a. A partir de les capes decimorreductores determinades.

   b. A partir de càlculs directes de la taxa de dosi en el punt a protegir en que es simula el gruix total necessari. Donats els elevats espessors esperats, i que

requereixen per tant d'elevats temps de computació, aquestes simulacions tant sols s'han pogut efectuar en alguns casos.

5.1. Model simplificat del Microtró pel càlcul de la radiació de fuita

Els components del Microtró considerats en la modelització amb PENELOPE són: l'estructura d'acceleració, els dos imants de retorn, la plataforma de suport i les parets de la cambra de buit.

Segons el disseny, una de les parets de la cambra de buit té forats especials per la instal·lació de passamurs (*feedthroughs*) per introduir cables de control, tubs del sistema de refrigeració i la guia d'ones d'alimentació de l'estructura d'acceleració del Microtró. En aquest estudi només s'ha modelat el forat central procedent del tub que porta la guia d'ones cap a l'estructura d'acceleració per ser el més gran i per la seva situació (està al costat de l'estructura d'acceleració). Per tal de tenir en compte que la radiació que entri en el tub, com a mínim haurà de travessar l'espessor corresponent al gruix del mateix, aquest fet s'ha modelat com una làmina amb espessor equivalent al gruix lateral del tub. Els altres forats, a part de ser considerablement menors, estan completament ocupats amb diferents elements, principalment tubs de coure, raó per la qual no s'han considerat en aquest estudi.

En la Figura 5.1 s'aprecien els elements interns del capçal del Microtró i la paret foradada de la cambra de buit amb els eixos de referència considerats.

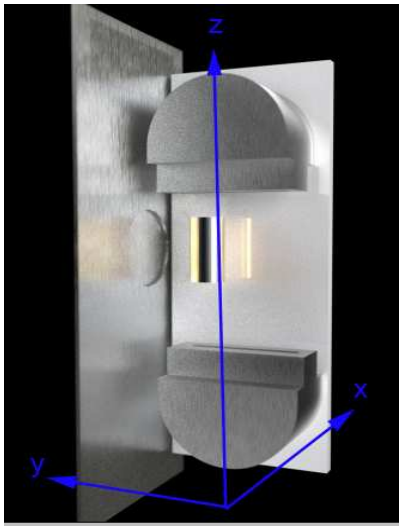

Figura 5.1. Model simplificat del capçal del Microtró amb eixos de referència

Per l'estudi de la radiació de fuites produïda per les pèrdues que es donen a l'interior del capçal del Microtró, s'han tingut en compte els resultats obtinguts prèviament en simulacions de la dinàmica del feix amb el codi RTMTRACE. Segons aquests resultats, les pèrdues en les òrbites d'alta energia es poden reduir considerablement amb l'ús d'un col·limador instal·lat a l'òrbita de 4 MeV a la sortida de l'imant de retorn [2].

En les òrbites de baixa energia la secció transversal del feix és una el·lipse que s'aproxima a un rectangle de 10 x 5 mm.

El model proposat per simular les pèrdues consisteix en 4 blancs situats en els punts on es preveu la interacció del feix amb els components del Microtró [2].

- Blanc 1: És una placa de coure d'1 mm de gruix situada en el centre de l'estructura d'acceleració perpendicular a l'eix del feix. Modela les pèrdues produïdes pels electrons de baixa energia que xoquen amb els components de les cavitats interiors del l'estructura d'acceleració a l'òrbita 0.

- Blanc 2: Modela la interacció del feix amb l'extrem de l'estructura d'acceleració en el moment de retorn en l'òrbita 0. Aquest fenomen es dóna degut a la presència d'electrons amb energies que difereixen bastant de l'energia nominal de 2 MeV.

- Blanc 3: Modela el col·limador d'Alumini de 10 mm de gruix situat a la sortida de la primera òrbita de l'imant de retorn M2. Aquest, absorbeix electrons l'energia dels quals es desvia considerablement de l'energia nominal de 4 MeV.

- Blanc 4: Modela la finestra de sortida. És representat com un disc de titani de 20 μm de gruix.

Les energies màximes del feix en el moment de cada interacció, les intensitats abans i després d'aquesta, i la intensitat que es perd es mostra a la Taula 5.1 [2]. S'han considerat les energies màximes i no les energies mitjanes per ser el cas més restrictiu.

Les intensitats que es mostren corresponen a una intensitat nominal a la sortida del feix del Microtró de 1 μA.

	E_{max} (MeV)	I_{in} (μA)	I_{out} (μA)	$I_{perd.}$ (μA)
Blanc 1	0.01	8.70	2.95	5.75
Blanc 2	1.9	2.95	1.36	1.59
Blanc 3	4	1.36	1.01	0.35
Blanc 4	12	1.01	1	0.01

Taula 5.1. Paràmetres del feix en interaccionar amb els blancs

5.2. Modelització i metodologia d'estudi amb PENELOPE

Per al càlcul de taxa de dosi amb el codi de simulació PENELOPE amb geometries que impliquen distàncies grans i materials de gruix considerable que han de ser travessats per la radiació, és útil la creació dels fitxers d'espai de fase (PSFs) per dividir el problema en diferents etapes. En cada etapa es pot simular la trajectòria d'una mateixa partícula un nombre definit de vegades fent disminuir la incertesa del problema [8].

El càlcul de blindatge objectiu d'estudi s'ha realitzat majoritàriament en tres etapes. En la primera etapa (generació del PSF 1) es simula:

- La generació de la radiació secundària (principalment fotons de radiació de frenada) en incidir el feix primari d'electrons en la copa de Faraday, en el cas d'estar simulant aquesta component.

- La generació de la radiació de fuites (principalment fotons de radiació de frenada), en incidir el feix en els blancs proposats en les diferents òrbites.

En la segona etapa es simula el transport de la radiació des del detector d'impacte on s'ha emmagatzemat el PSF 1 fins a un punt proper al punt a protegir en l'estudi (generació del PSF 2), i finalment, la tercera consisteix en utilitzar el PSF 2 com a font de radiació per calcular la taxa de dosi al lloc a protegir.

En els següents apartats es detalla el procés per a cada component de la radiació considerada. Els resultats finals es consideraran acceptables amb incerteses estadístiques (s) amb k=1 de l'ordre d'un 10% en la taxa de dosi en el punt a protegir.

5.2.1. Creació del primer PSF

- **Radiació secundària + terciària**

Per la radiació secundària + terciària s'utilitza la mateixa geometria de creació del PSF 1 per les dues configuracions de blindatge considerades (Veure Apartat 4.1.3). La diferència està en el material situat sota la copa de Faraday, que és formigó quan s'estudia el blindatge convencional i plom en el cas del blindatge local.

A les Figures 5.2, 5.3 i 5.4 es visualitza la geometria utilitzada per la creació del PSF 1 amb el programa GVIEW2D on tots el cossos mostrats tenen geometria cilíndrica. El cos lila és formigó o plom, el cos taronja la copa de la Faraday i el cos blau i verd és aire. El verd modela el detector on s'emmagatzema el PSF 1.

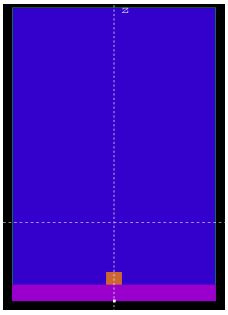

Figura 5.2. Alçat de la geometria de creació del PSF 1

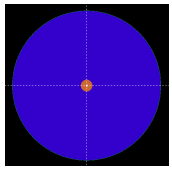

Figura 5.3. Planta de la geometria de creació del PSF 1

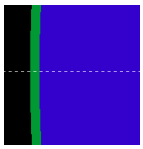

Figura 5.4. Ampliació del PSF 1

La copa de Faraday es modela com un cilindre d'alumini de 4 cm d'altura i 4 cm de diàmetre.

El feix d'electrons incideix perpendicularment al centre de la copa de Faraday en la posada a punt de l'equip. El detector on s'emmagatzema el PSF 1 s'ha modelat com una fina capa d'aire de 0.1 cm de gruix a una distància de 25 cm del centre (x,y) = (0,0) al llarg d'una alçada de 90 cm.

- **Radiació de fuites**

En aquest cas és important tenir en compte els components interns més significatius del Microtró ja que actuen d'autoblindatge.

En la Figura 5.5 s'observen els imants de retorn (1) i (4), l'estructura d'acceleració (2), la plataforma de suport (3), la cambra de buit que conté tos els components (5) i el cilindre que modela el detector d'impacte on s'emmagatzema el PSF 1 (6).

A la vista presentada en la Figura 5.6 s'indica amb fletxes on es produeix l'impacte del feix amb el blancs 2 (estructura d'acceleració) i el blanc 3 (col·limador d'alumini). En concret, les coordenades on impacta el feix són (x, y, z) = (0, 2.8, 58) cm pel blanc 2 i (x, y, z) = (0, 1.1, 37.67) cm pel blanc 3. També s'observa el forat d'una de les parets de la cambra de buit que modela el tub que porta la guia d'ones.

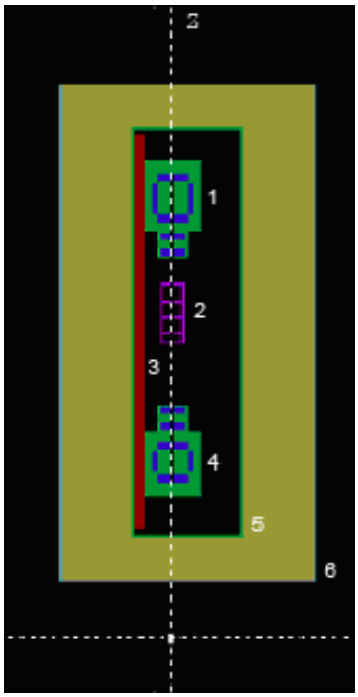

Figura 5.5. Pla y = 3.7 cm

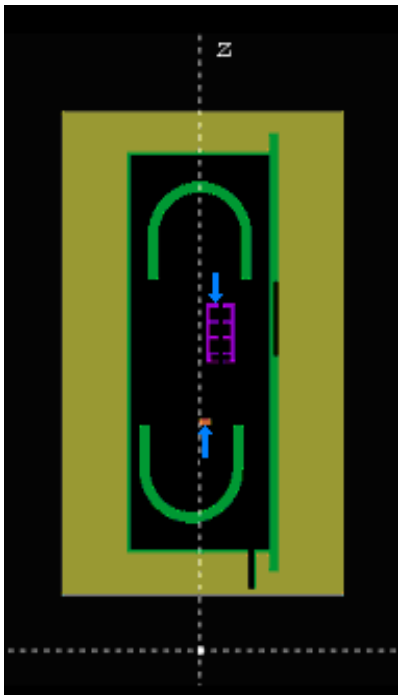

Figura 5.6. Pla x = 0 cm

En la Taula 5.2 s'indiquen els materials dels diferents component interns del microtró considerats.

Material	Coure (Cu)	Imant de $Nd_2Fe_{14}B$	Acer inoxidable (AISI 304 L)	Alumini inoxidable (Al 7075 T6)	Alumini (Al)
Components	Estructura d'acceleració/ Blanc 2	Imants de retorn	Imants de retorn/Cambra de buit	Plataforma de suport	Blanc 3

Taula 5.2. Materials dels components interns del Microtró

El detector d'impacte pel PSF 1 te les mateixes dimensions que les esmentades en el cas anterior però està centrat en el punt (x,y)=(-3, 0.5) cm que coincideix amb les coordenades de l'eix central de la cambra de buit.

Encara que la proposta de simulació de radiació de fuites estigui modelada en funció dels quatre blancs indicats a l'Apartat 5.1, s'ha simplificat l'estudi considerant les interaccions produïdes als blancs 2 i 3 degut a què:

- Al blanc 1, tot i produir-se pèrdues elevades, la baixa energia dels electrons de l'òrbita 0 dins de l'estructura d'acceleració fa que les partícules produïdes quedin atenuades totalment pels components del Microtró.

- Al blanc 4 les pèrdues són molt petites. A més, el disc de Titani és suficientment fi per deixar travessar els pocs electrons que interaccionen amb ell. S'assumeix que el blindatge d'aquesta component queda contemplada implícitament en el de la radiació secundaria del feix primari.

5.2.2. Creació del segon PSF

El procés de creació del PSF 2 és diferent segons per quina configuració s'estigui realitzant l'estudi. En els dos casos el detector d'impacte pel PSF 2 és una làmina de 0.1 cm de gruix orientada a la paret objecte d'estudi i situada a prop d'aquesta, però en el cas del blindatge local, aquest ja contempla l'efecte atenuant del material tal com s'observa a les Figures 5.7 i 5.8.

Degut a la simetria cilíndrica del problema en l'estudi dels efectes de la radiació secundària + terciària, la distribució de taxa dosi és similar per totes les parets laterals de la sala, per tant, és construeix un únic PSF 2 (PSF2_lateral) per l'estudi de totes elles. També es realitza un pel sostre (PSF2_sostre).

La geometria utilitzada per crear el PSF2_sostre és anàloga a la del PSF2_lateral.

En el cas del blindatge per recobriments de formigó es deixa un gruix de 6 cm d'aquest material a la resta de parets per les possibles contribucions de radiació terciària que correspon al cos blau de la Figura 5.7.

En l'estudi amb blindatge local, la component de radiació terciària estarà formada per els rebots produïts dins del cilindre de plom (cos blau de la Figura 5.8). Amb aquesta configuració es necessari crear un PSF 2 per cada gruix objecte d'estudi.

Els cossos taronja corresponen al PSF 1 i PSF 2.

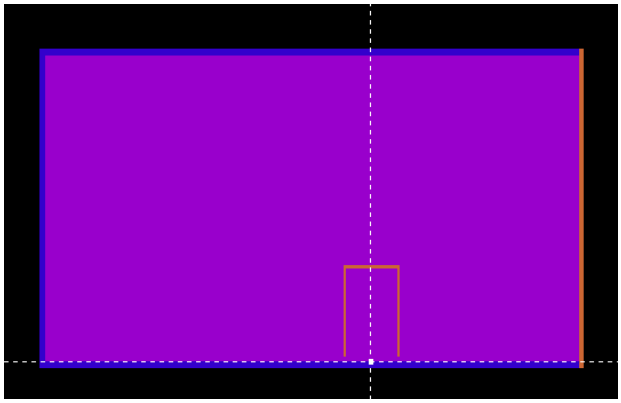

Figura. 5.7. Geometria de creació del PSF2_lateral pel blindatge amb recobriments de formigó

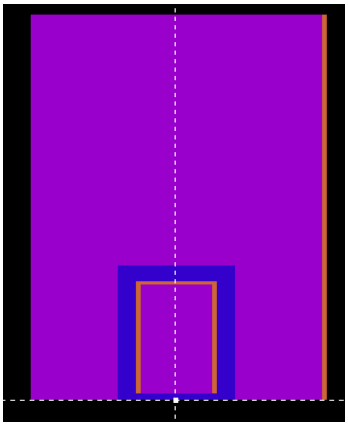

Figura 5.8. Geometria de creació del PSF2_lateral pel blindatge local

5.2.3. Càlcul de la taxa de dosi

Per calcular la taxa de dosi, es parteix del PSF 1, si amb aquest s'obtenen incerteses estadístiques tolerables, o del PSF 2 en cas contrari.

Quan s'utilitza el PSF 2, es prescindeix de la part de la sala que ja ha contribuït en la seva creació. En el cas del blindatge convencional s'incorpora el formigó tal com es veu a la Figura 5.9. Quan no es necessita formigó, la geometria utilitzada és la mateixa però sense el recobriment de material blindant.

El cos lila correspon al PSF 2, el taronja és aire, el blau modela el formigó i el verd és el detector.

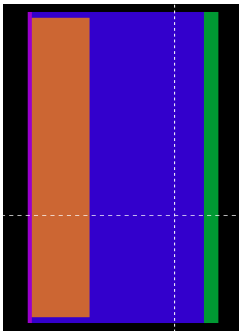

Figura 5.9. Geometria utilitzada pel càlcul de taxa de dosi amb formigó

Per la vigilància d'àrea s'ha de realitzar la mesura de taxa de l'equivalent de dosi ambiental H*(10), a 10 mm de profunditat del detector. En PENELOPE s'ha modelat el detector com una placa de 10 cm de gruix dividida en tres parts tal com s'obseva en la Figura 5.10.

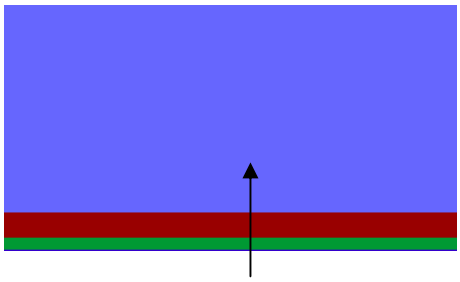

Figura 5.10. Model del detector. La fletxa indica d'on prové la radiació

El pla intermig del cos vermell, que és la zona de detecció activa amb un gruix d'1 cm, es troba a 10 mm de profunditat i és on es calcula la taxa de dosi considerant una malla quadrada de 30 x 30 cm.

5.3. Estudi de la taxa de dosi a les parets sense blindatge

Es realitza un estudi previ de la taxa de dosi produïda a les parets de la sala i al sostre sense blindatge, tant per la radiació secundària + terciària com per la radiació de fuites.

5.3.1. Gràfics de distribució de taxa de dosi

Es mostren els gràfics de distribució de taxa de dosi al sostre i a les parets de la sala. Degut a la simetria existent en el cas de la radiació secundària + terciària, les distribucions a les parets A i C i en les parets B i D són les mateixes respectivament. Per la radiació de fuites no existeix aquesta simetria, per tant, es presenten els gràfics per totes direccions.

- **Radiació secundària + terciària**

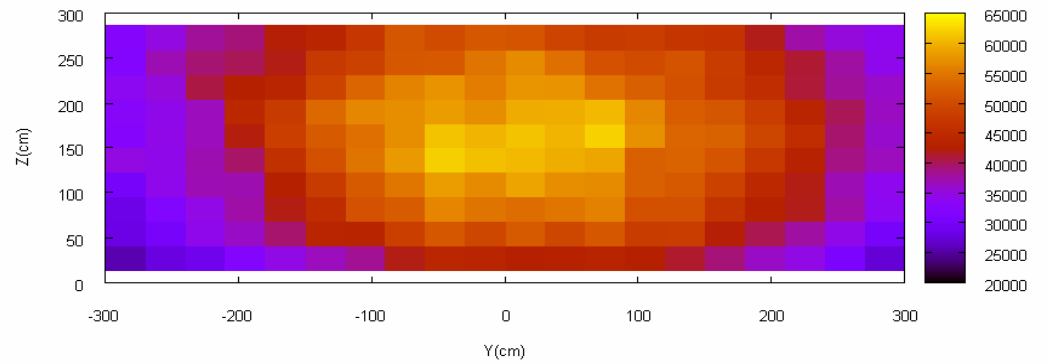

Figura 5.11. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació secundària + terciària a les parets A i C

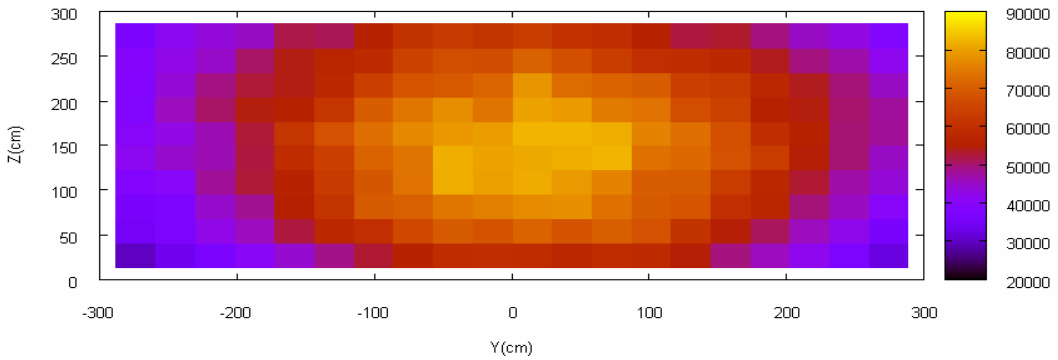

Figura 5.12. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació secundària + terciària a les parets B i D

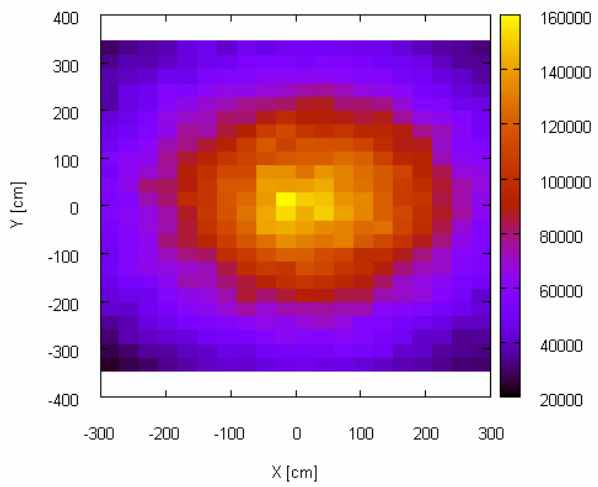

Figura 5.13. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació secundària + terciària al sostre

- **Radiació de fuites**

Es presenten els gràfics de distribució de taxa de dosi obtinguts per la radiació de fuites total, és a dir, per la suma de les contribucions dels blancs 2 i 3.

Els gràfics resultant per cadascun dels blancs per separat es troben a l'Apartat B.3 de l'Annex B.

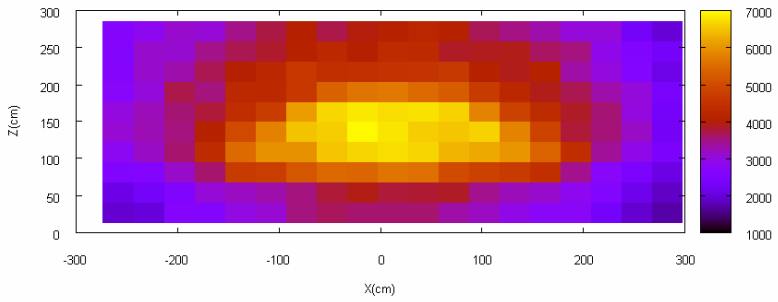

Figura 5.14. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites a la paret A

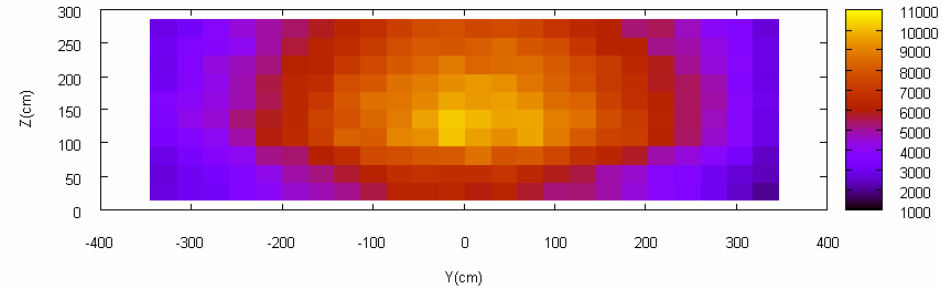

Figura 5.15. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites a la paret B

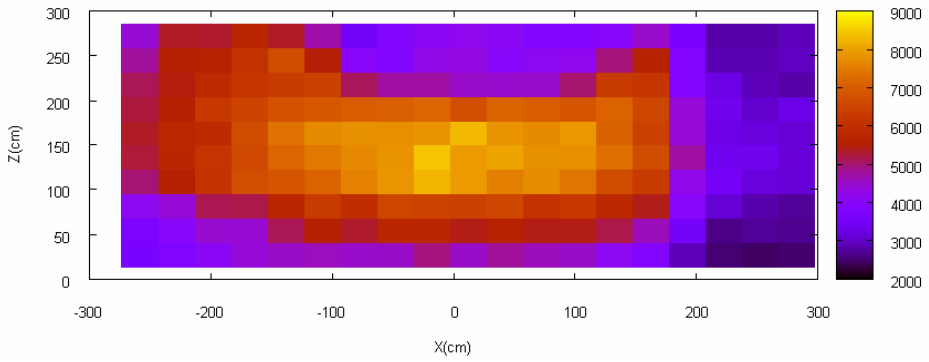

Figura 5.16. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites a la paret C

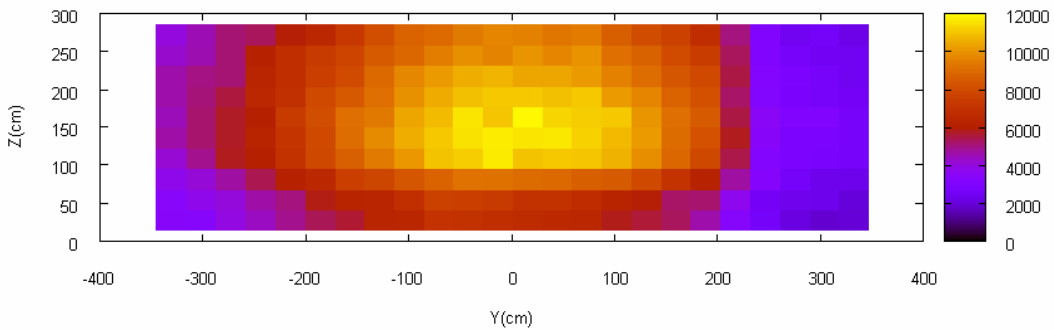

Figura 5.17. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites a la paret D

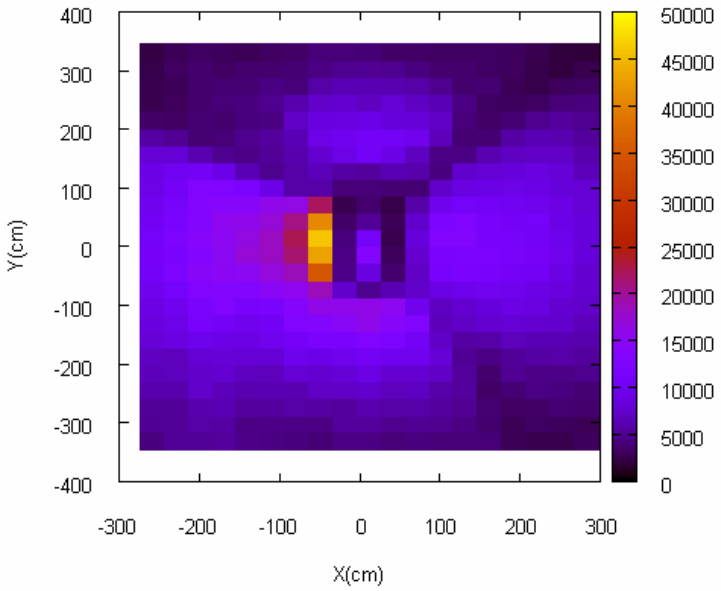

Figura 5.18. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites al sostre

5.3.2. Interpretació dels gràfics

Per comentaris de la radiació de fuites s'han utilitzat les figures presentades a l'Apartat B.3 de l'Annex B.

- **Radiació secundària + terciària**

A les Figures 5.11 i 5.12 s'observa una distribució similar per les parets laterals amb diferències en la magnitud de taxa de dosi degut a la diferència en la distància d'aquestes parets respecte la font (50 cm) (Veure Figura 4.3). També es nota que la zona de taxa de dosi màxima es troba en el centre, ja que la distància font-detector és mínima per aquests punts.

- **Radiació de fuites**

En les Figures presentades a l'Apartat B.3 de l'Annex B, s'observa que totes le parets laterals presenten una taxa de dosi màxima més elevada pel blanc 2; el sostre, en canvi, la presenta pel blanc 3. Això es degut a la distribució angular de la radiació produïda i a què, les pèrdues al blanc 2 són més elevades tot i ser el feix menys energètic.

Pel que fa a l'efecte autoblindant dels elements interns del capçal del Microtró, la Figura 5.16 mostra una discontinuïtat en la simetria per y a partir d'aproximadament 200 cm degut a l'efecte de la plataforma de suport. De la mateixa manera, la Figura 5.17 la mostra per efecte de la paret amb més gruix de la cambra de buit. En la Figura 5.16 s'observa també l'atenuació per part de l'imant a la part superior central.

A les parets A i B no s'aprecien discontinuitats degut a que aquestes parets són paral·leles a la paret de més gruix de la cambra de buit i a la plataforma de suport respectivament, i tota la radiació produïda és atenuada per aquests components. A la distribució de taxa de dosi que presenten aquestes parets s'observa que la taxa de dosi màxima es troba el centre degut majoritariament a que és la distància minima entre font-detector. (Veure Figures 5.14 i 5.15).

El sostre presenta una influència molt significativa del blanc 3. Com era d'esperar, la direcció predominant de la radiació generada en aquest blanc és vertical cap amunt. Tant en la Figura B.29 com en la B.30 de l'Annex B s'aprecia l'efecte de l'imant en la part central de les esmentades figures. A la Figura B.29, s'observen dues zones (els extrems) on la taxa de dosi és més elevada. El fet que en la part de les x positives la taxa de dosi sigui inferiror a la part de les x negatives és degut a l'efecte de la plataforma de suport. Aquest efecte també s'observa en la Figura B.30.

5.3.3. Conclusions

A la Taula 5.3 s'indiquen les taxes de dosi màxima obtingudes per cada component sense element blindant i la relació entre aquestes.

	A	B	C	D	S
H_{max}(sec+terc) [mSv/any]	6,15E+04	8,25E+04	6,15E+04	8,25E+04	1,59E+05
H_{max}(fuites) [mSv/any]	6,96E+03	1,02E+04	8,44E+03	1,19E+04	4,60E+04
H_{max}(sec+terc)/H_{max} (fuites)	8,84	8,07	7,29	6,91	3,46

Taula 5.3. Resultats de taxa de dosi màxima al lloc a protegir sense element blindant

Degut a la petita diferència de distàncies (50 cm) entre les parets laterals de la sala respecte la font, per les simulacions amb PENELOPE posteriors s'estudiarà el cas més restrictiu, és a dir, es calcula l'espessor per la paret D (la paret B està a la mateixa distància però la radiació de fuites produeix una taxa de dosi lleugerament inferior) i es manté aquest gruix per les altres parets. El cas del sostre s'estudia per separat.

La taxa de dosi calculada al sostre per les pèrdues produïdes al blanc 3 és d'un ordre de magnitud superior a l'obtinguda pel blanc 2 tal com s'observa a les Figures B.29 i B.30 presents a l'Annex B, per tant, es simplifica l'estudi considerant els efectes del blanc 3 com el total produït per la radiació de fuites al sostre.

A les parets laterals s'estudia els efectes dels dos blancs (2 i 3), ja que el blanc 2 és el que més taxa de dosi produeix però és el menys energètic; s'esperen CDRs superiors en l'estudi de les pèrdues produïdes al blanc 3.

5.4. Càlcul del blindatge amb recobriments de formigó

5.4.1. Càlcul a les parets laterals

Segons els resultats presentats a la Taula 5.3, la radiació secundària + terciària és la component més desfavorable sent la que més taxa de dosi produeix i també la més energètica ja que prové dels raigs X produïts per electrons de 12 MeV. Pel que fa a la radiació de fuites a les parets laterals, la interacció del feix (1.9 MeV) amb el blanc 2 és el que produeix més taxa de dosi sense blindatge tal com s'observa de la Figura B.21 a la Figura B.28 de l'Annex B, però el feix és més energètic en interaccionar amb el blanc 3 (4 MeV).

En aquest cas es creu necessari simular les contribucions dels dos blancs que produeixen la radiació de fuites així com la contribució de la radiació secundària + terciària.

A continuació es presenten els gràfics que relacionen la taxa de dosi amb l'espessor de formigó a la paret lateral D pels diferents components de radiació.

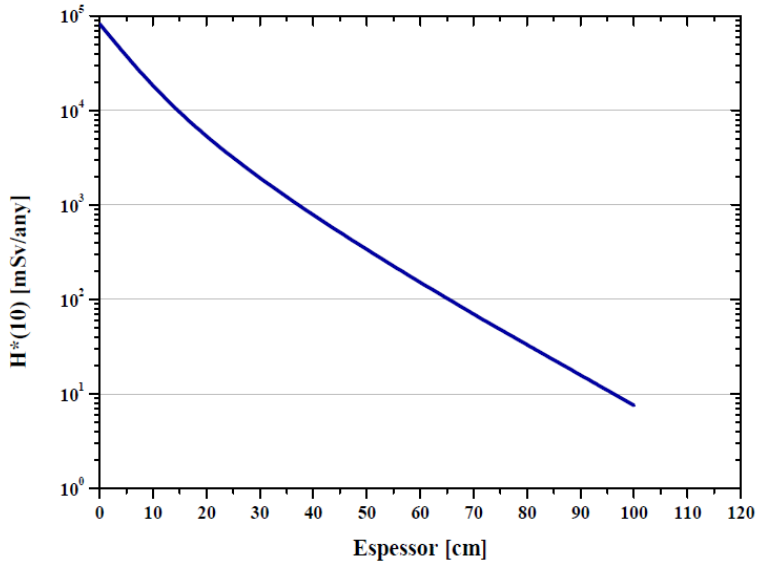

Figura 5.19. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de formigó per la radiació secundària + terciària

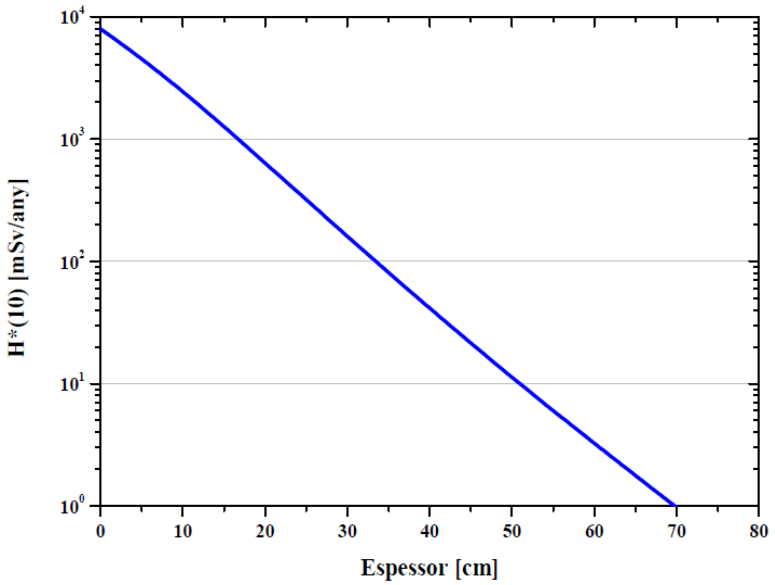

Figura 5.20. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de formigó pel blanc 2

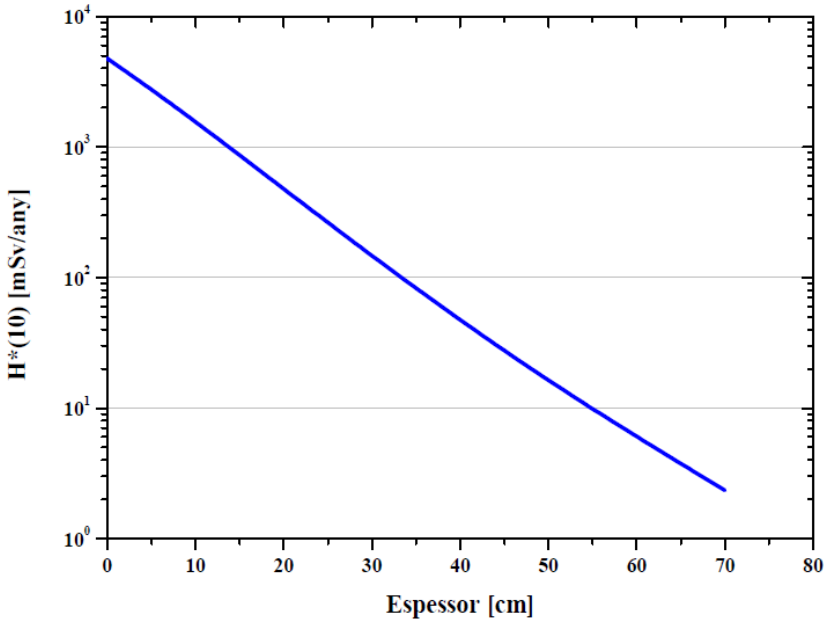

Figura 5.21. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de formigó pel blanc 3

A la Taula 5.4 es presenten les CDRs i el gruix de formigó necessari per cada component obtingut a partir de les Figures 5.19, 5.20 i 5.21. Es recorda que el factor d'ocupació per les parets laterals s'ha fixat en T=0.1, per tant, l'espessor necessari (S) correspon en aquest cas al que permet una taxa de dosi de 10 mSv/any.

	CDR_1 [cm]	CDR_2 [cm]	CDR_{eq} [cm]	S [cm]
Sec + terc	15	24	28	95
Fuites B2	18	18	18	50
Fuites B3	20	20	20	55

Taula 5.4. CDRs per parets laterals i gruix de formigó necessari per cada component de radiació

S'observa que la radiació secundària + terciària triga més en assolir l'equilibri, ja que les primeres CDRs difereixen de la CDR_{eq}. Es considera l'assoliment de l'estat d'equilibri quan el comportament de la corba H*(10) és lineal i el pendent de la recta tangent es manté constant. Aquest comportament es dóna a causa del fet que, l'espectre energètic dels fotons que constitueixen la radiació secundaria + terciària és més ampli (0-12 MeV) que el resultant de la radiació de fuites que com a molt va de 0-4 MeV. Així doncs, les primeres capes atenuen els fotons de baixa energia i a partir d'aquestes queden els fotons més energètics que necessiten més gruix per ser atenuats.

Per al càlcul del gruix total necessari per blindar totes les components s'ha optat per utilitzar el criteri proposat a la Norma DIN 6847 part 2 presentat a la Taula 4.2 del present projecte.

Segons aquesta, comparant els espessors obtinguts per cadascun dels blancs considerats, el gruix total necessari per blindar la radiació de fuites és de 61 cm tal com es mostra en les Equacions 5.1.

$$55\text{ cm} - 50\text{ cm} = 5\text{ cm},\ \ 5\text{ cm} < 0.3\cdot 20\text{ cm},\ \ S = 55\text{ cm} + 0.3\cdot 20\text{ cm} = 61\text{ cm} \qquad \text{Equacions 5.1}$$

Si es fa el mateix càlcul comparant el gruix total per la radiació de fuites amb el necessari per la radiació secundària + terciària s'obté que amb els 95 cm queden blindades totes les components tal com es mostra en les Equacions 5.2

$$95\text{ cm} - 61\text{ cm} = 34\text{ cm},\quad 34\text{ cm} < 28\text{ cm},\quad S = 95\text{ cm} \qquad \text{Equacions 5.2}$$

Es considera doncs que les zones delimitades per les parets laterals estaran blindades amb un espessor de formigó de 95 cm.

Per altra banda, a partir de càlculs directes de la taxa de dosi en el punt a protegir en que es simula el gruix total necessari, les Figures 5.22 i 5.23 mostren la distribució de taxa de dosi a la paret D per un gruix de 80 cm i 100 cm de formigó respectivament deguda a la radiació secundària + terciària. Es mostra aquesta component de radiació per ser la més restrictiva.

A les distribucions presentades en les Figures 5.22 i 5.23 s'ha tingut en compte el nombre d'hores d'ocupació real aplicant un factor d'ocupació de T= 0.1.

Amb 100 cm de formigó la taxa de dosi màxima és de 0.75 mSv/any, amb el que es comprova que l'aplicació del concepte de capa decimorreductora d'equilibri condueix a resultats compatibles amb la simulació del gruix total. Així mateix, posa de manifest que l'ús del valor de la primera capa decimorreductora com a únic valor de referència conduiria a subestimar el blindatge. En concret el gruix que s'obtindria seria de 58.5 cm tal com es mostra a les Equacions 5.3, on es troba el nombre de CDRs necessàries aplicant el logartime a la relació entre la taxa de dosi inicial i la final i aquest nombre es multiplica pel valor de la CDR_1.

$$\log \frac{H^*(10)_i}{H^*(10)_f} = n\,, \qquad \log \frac{8.25 \cdot 10^4\, mSv/any}{10 mSv/any} = 3.9\,\text{CDRs},$$

$$S = 3.9 \cdot 15\ \text{cm} = 58.5\ \text{cm}$$

Equacions 5.3

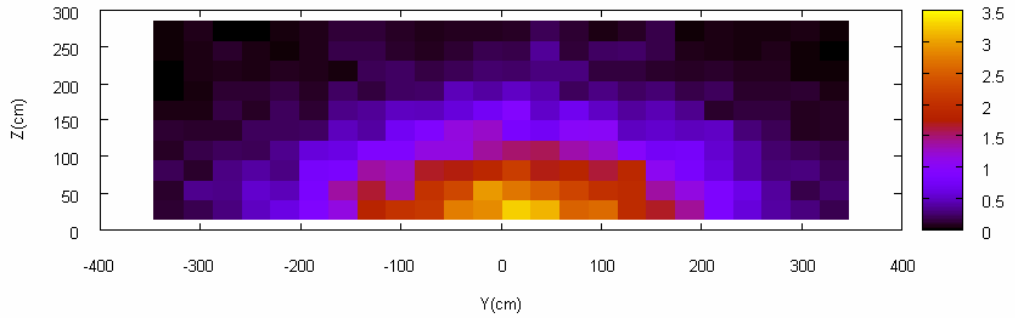

Figura 5.22. Distribució de H*(10) [mSv/any] a la paret D per radiació secundària + terciària amb 80 cm de formigó

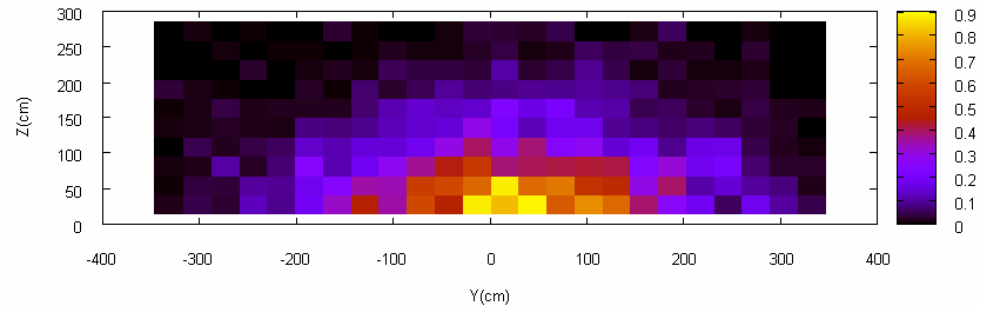

Figura 5.23. Distribució de H*(10) [mSv/any] a la paret D per radiació secundària+terciària amb 100 cm de formigó

5.4.2. Càlcul al sostre

En el cas del sostre, la interacció del feix amb el blanc 3 és la que té una contribució clarament dominant pel que fa la radiació de fuites tal com s'observa a les figures B.29 i B.30 de l'Annex B.

El blanc 3 és el més energètic, per tant les CDRs seran en tot cas de gruix més elevat que pel blanc 2 i a més, la seva contribució en necessita més número de CDRs, per tant, amb el gruix obtingut per la contribució de les pèrdues produïdes al blanc 3 es considera blindat el sostre per la radiació de fuites.

A les Figures 5.24 i 5.25 es mostra la relació entre la taxa de dosi i l'espessor de formigó al sostre per les diferents components de radiació.

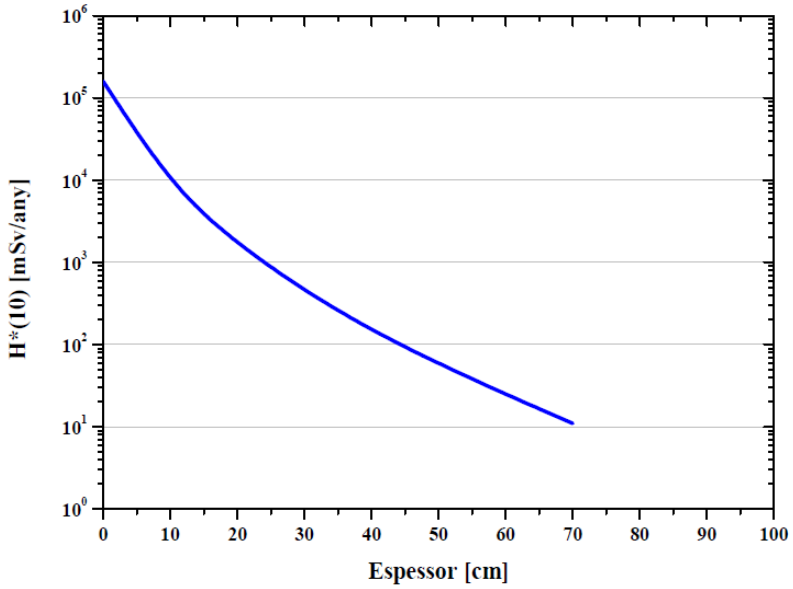

Figura 5.24. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de formigó per la radiació secundària + terciària

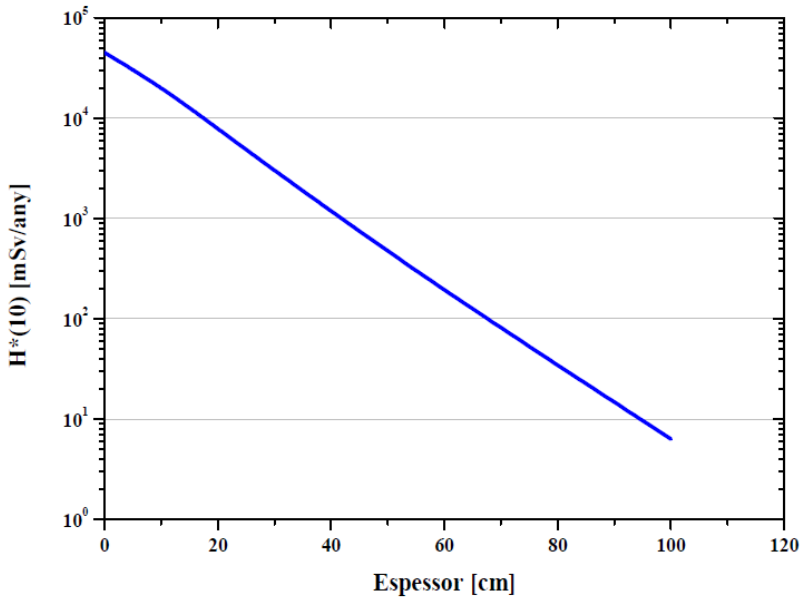

Figura 5.25 Variació de H*(10) en funció de l'espessor de formigó pel blanc 3

De manera anàloga al cas anterior, s'observa que l'equilibri s'assoleix a partir de gruixos elevats en el cas de la radiació secundària + terciària mentre que per la radiació de fuites el pendent es manté pràcticament constant des de l'inici. Tot i així, en el cas del sostre l'efecte és més pronunciat degut possiblement a la distribució angular de la radiació.

Tal com s'observa a les Figura 5.24 i 5.25, els gruixos més elevats inclosos als gràfics són de 70 cm i 100 cm respectivament. La incertesa estadística (s) amb k=1 per un espessor de 100 cm de formigó per la radiació secundària + terciària és de l'ordre d'un 40 %; i en el cas de la radiació de fuites produïda pel blanc 3 amb 120 cm de formigó és del 25 %. D'aquesta última simulació en resulta una taxa de dosi de 1.17 mSv/any. Degut a l'elevada incertesa obtinguda a partir de simulacions directes, pel càlcul del gruix total només s'utilitzarà el concepte de capa decimorreductora.

A la Taula 5.5 es mostren el valors de les primeres CDRs i de la CDR_{eq} així com el gruix de formigó obtingut per extrapolació de la corba.

	CDR_1 [cm]	**CDR_2 [cm]**	**CDR_{eq} [cm]**	**S [cm]**
Sec + terc	9	11	30	100
Fuites B3	25	25	25	120

Taula 5.5. CDRs pel sostre i gruix de formigó necessari per cada component de radiació

S'assumeix que a partir d'espessors tan elevats la CDR es manté constant i correspon a la CDR_{eq}, per tant, els gruixos proposats per cada component de radiació s'obtenen per extrapolació.

Realitzant el mateix càlcul que a l'apartat anterior s'obté,

$$120 \text{ cm} - 100 \text{ cm} = 20 \text{ cm} \qquad 0.6 \cdot 30 \text{ cm} < 20 \text{ cm} < 30 \text{ cm},$$

$$S = 120 \text{ cm} + 0.1 \cdot 30 \text{ cm} = 123 \text{ cm} \qquad \text{Equacions 5.4}$$

Es considera doncs que la zona delimitada pel sostre estarà blindada amb un espessor de formigó de 123 cm.

Per altra banda, a partir de càlculs directes de la taxa de dosi en el punt a protegir en que es simula el gruix total necessari, a les Figures 5.26 i 5.27 s'observa la distribució de taxa de dosi al sostre per un gruix de 70 cm de formigó degut a la radiació secundària + terciària i per un gruix de 100 cm per la radiació de fuites respectivament, amb el que es comprova que calen gruixos de més de 100 cm, resultat compatible amb el càlcul anterior.

En aquest cas, es recorda que el factor d'ocupació és T=1

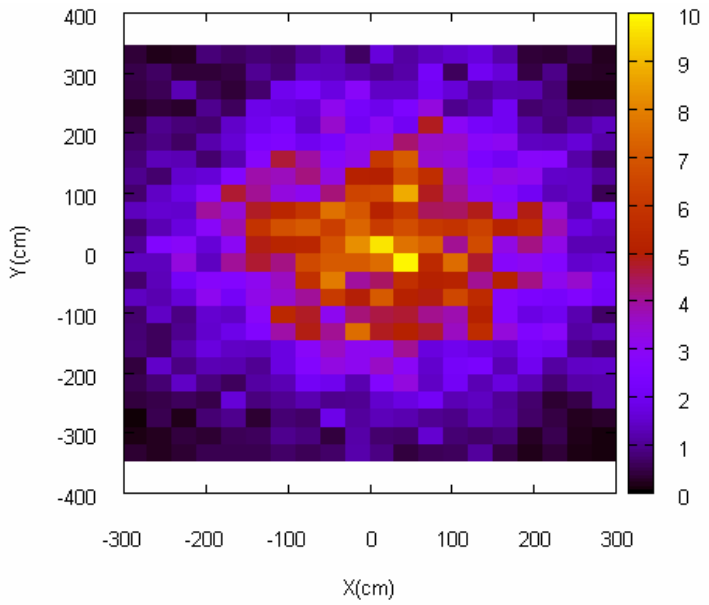

Figura 5.26. Distribució de H*(10) [mSv/any] per la radiació secundària + terciària al sostre amb 70 cm de formigó

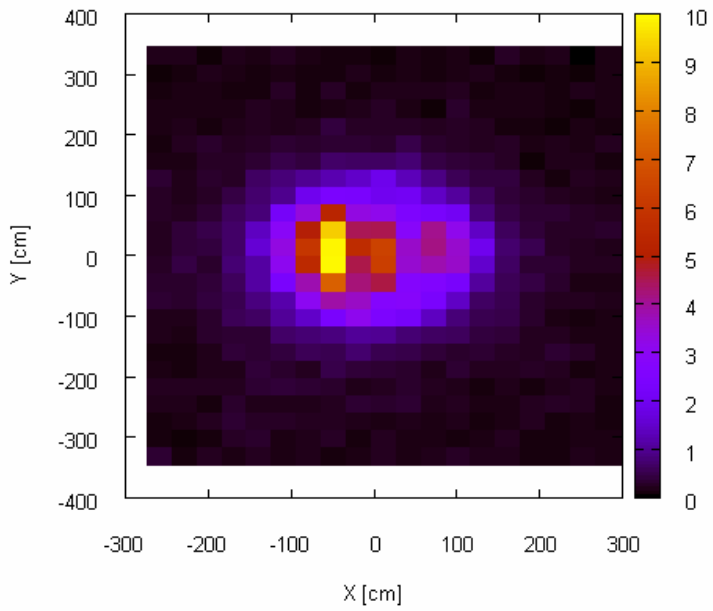

Figura 5.27. Distribució de H*(10) [mSv/any] per la radiació de fuites (B3) al sostre amb 100 cm de formigó

5.5. Càlcul del blindatge local de plom

El blindatge en aquest cas consisteix en un cilindre de plom amb un diàmetre interior de 50 cm i 90 cm d'altura a l'interior (veure Figura 5.8) que envolta el capçal de l'accelerador. Igual que en el cas anterior, s'obtenen les corbes que relacionen la taxa de dosi amb el gruix de blindatge per poder determinar les CDRs i l'espessor necessari per complir el límit de dosi d'1 mSv/any. La taxa de dosi es determina a les parets de la sala (no just després del blindatge de plom) per contemplar la reducció produïda pel factor distància.

Al tractar-se d'un blindatge local, el gruix de plom situat a la superfície lateral del cilindre té efecte sobre la taxa de dosi produïda al sostre de la sala. Per aquest motiu, el càlcul de taxa de dosi s'ha dut a terme en totes les simulacions amb el mateix gruix de plom tant a la superfície lateral com a la tapa del cilindre que actua de blindatge.

No es consideren viables des d'un punt de vista constructiu espessors de plom que superin els 15 cm. En aquest cas es procedirà a reduir la intensitat nominal del feix de sortida del Microtró.

Cal recordar que en l'estudi de la configuració amb recobriments de formigó, s'observa que el cas del sostre és més restrictiu que el de les parets laterals degut al factor d'ocupació, al fet

que les CDRs són més elevades; i a que és la zona on es produeix més taxa de dosi sense tenir en compte un blindatge tal com es mostra a la Taula 5.3. També s'ha demostrat que l'efecte de la radiació de fuites al sostre és degut principalment a les pèrdues produïdes al blanc 3.

Segons aquests resultats, es presenten primer els resultats obtinguts al sostre (en comptes de els de les parets laterals), per efecte de la radiació secundària + terciària i per les pèrdues produïdes al blanc 3 com a contribució principal de la radiació de fuites.

5.5.1. Càlcul al sostre

En les Figures 5.28 i 5.29 es mostra la relació entre la taxa de dosi obtinguda al sostre de la sala i l'espessor de plom del blindatge local utilitzat per intensitats nominals d'1 μA i 0.1 μA.

En tot l'estudi s'ha considerat una intensitat nominal de funcionament d'1 μA, però per les limitacions de pes que representaria un blindatge de plom de més de 15 cm de gruix, es proposa una disminució d'un factor 10 d'aquesta, per complir el límit de dosi d'1 mSv/any. Aquesta reducció de la intensitat implica una reducció de la taxa de dosi amb el mateix factor degut a la proporcionalitat de les dues magnituds, per tant, desplaçant el gràfic cap a baix un factor 10 (corba verda) obtenim doncs la relació per $I_{nom} = 0.1\ \mu A$.

A la Figura 5.29, s'aplica la intensitat de pèrdues produïda al blanc 3 i aquesta també és directament proporcional a la intensitat nominal segons la relació presentada a l'Equació 5.5 [2].

$$I_{perdues,n} = \frac{\alpha_n}{1-\sum_{n=1}^{4}\alpha_n} \cdot I_{nominal} \qquad \text{Equació 5.5}$$

on α és la fracció de pèrdues que es produeix i l'índex n denota de quin blanc s'està realitzant el càlcul.

Per tant, la intensitat de pèrdues es redueix també en un factor 10.

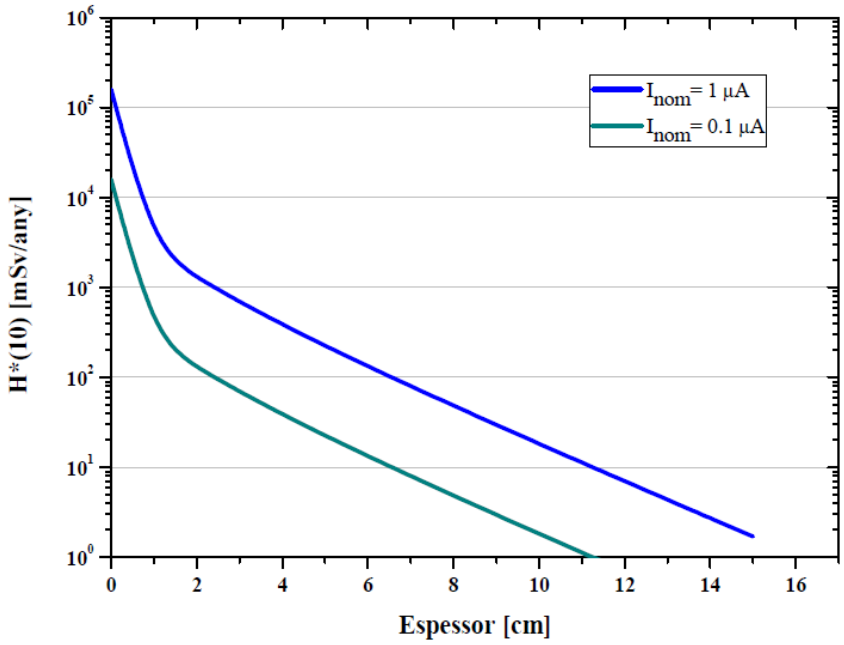

Figura 5.28. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de plom per la radiació secundària + terciària als sostre

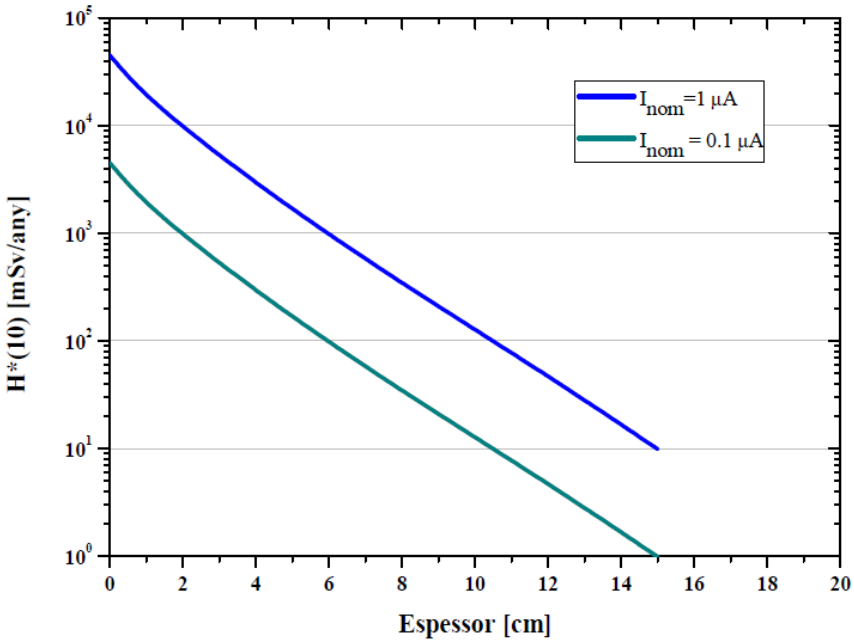

Figura 5.29. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de plom pel blanc 3 al sostre

El comportament de la corba és el mateix que en els casos anteriors. Aquesta diferència entre les primeres CDRs es mostra a la Taula 5.5 així com l'espessor de plom necessari obtingut per extrapolació per les dues intensitats nominals presentades.

	CDR_1 [cm]	CDR_2 [cm]	CDR_{eq} [cm]	$S_{I=1\mu A}$ [cm]	$S_{I=0.1\mu A}$ [cm]
Sec + terc	0.5	1	4.5	16	11
Fuites B3	3	3	4.5	19.5	15

Taula 5.6. CDRs pel sostre i gruix de plom necessari per cada component de radiació

Aplicant el càlcul que suggereix la Norma DIN 6847 part 2, detallat a la Taula 4.2 del present projecte, per tenir en compte totes les components de la radiació en el punt a protegir es necessiten aproximadament 20 cm de plom per una intensitat d'1 μA i 15.5 cm per 0.1 μA per protegir la zona limitada pel sostre.

Tot i així, tal com mostren les Figures 5.30 i 5.31, realitzades tenint en compte una intensitat nominal de sortida del feix de 0.1 μA, les zones de taxa de dosi màxima no coincideixen.

Cal afegir que en el pitjor dels casos, en el qual les zones de taxa de dosi màxima coincidissin, la suma d'aquestes segons les simulacions Monte Carlo seria de 1.16 mSv/any, magnitud que està dintre de les incerteses estadístiques que venen associades amb les simulacions.

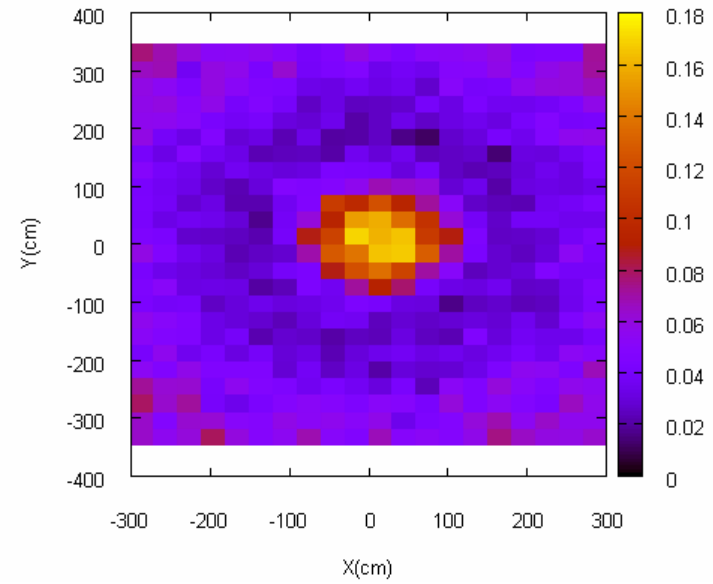

Figura 5.30. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació secundària + terciària al sostre amb 15 cm de plom i una intensitat de 0.1 μA

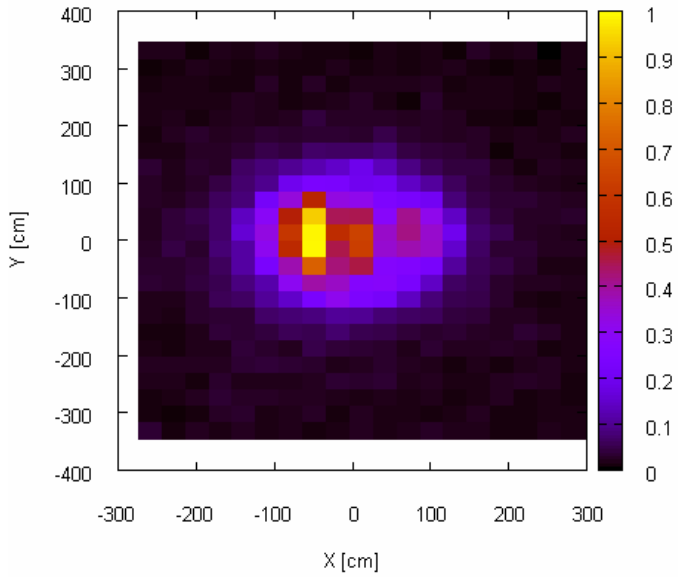

Figura 5.31 Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació de fuites (B3) al sostre amb 15 cm de plom i una intensitat de 0.1 μA

5.5.2. Càlcul a les parets laterals

Simulacions realitzades pel càlcul de blindatge local a les parets laterals per la component de radiació secundària + terciària, posen de manifest la necessitat de 10 cm de plom per respectar el límit de dosi d'1 mSv/any tenint en compte el factor d'ocupació considerat (T = 0.1) i una intensitat nominal de 0.1 μA, tal com s'observa al Figura 5.32.

Radiació secundària+terciària

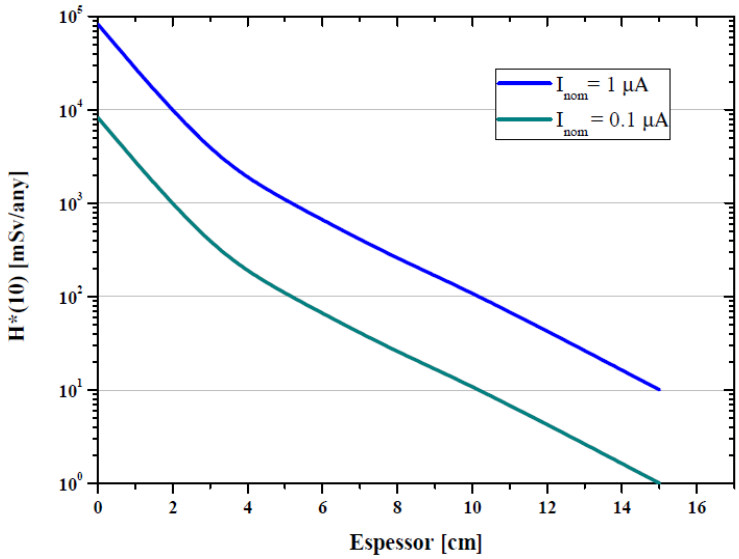

Figura 5.32. Variació de H*(10) en funció de l'espessor de plom per la radiació secundària + terciària

A les parets laterals la contribució de la radiació secundària + terciària és predominant tal com s'observa la Taula 5.3. Aquest resultat també es posa de manifest amb els gruixos obtinguts per components a l'apartat 5.4.1 en el cas de la configuració de blindatge per recobriment de les parets amb formigó. El gruix de blindatge necessari per protegir d'aquesta component les zones adjacents a les parets laterals de la sala amb una intensitat de 0.1 μA és de 10 cm de plom segons mostra la Figura 5.32. Com es necessiten 15 cm de gruix lateral al cilindre del blindatge local per protegir el sostre, tal com s'ha estudiat anteriorment, no s'han realitzat simulacions en aquest cas de l'efecte de la radiació de fuites, ja que l'efecte d'aquesta no es considerable i els 15 cm ja suposen un reforç de 5 cm al gruix obtingut per la radiació secundària + terciària.

A la Taula 5.7 es mostren les CDRs i els espessors de plom obtinguts en aquest cas.

	CDR_1 [cm]	**CDR_2 [cm]**	**CDR_{eq} [cm]**	**$S_{I=1\mu A}$ [cm]**	**$S_{I=0.1\mu A}$ [cm]**
Sec + terc	2	3.5	5	15	10

Taula 5.7. CDRs per les parets laterals i gruix de plom necessari per la radiació secundària + terciària

Per altra banda, a partir de càlculs directes de la taxa de dosi en el punt a protegir en que es simula el gruix total necessari, en la Figura 5.33 es mostra la distribució de taxa de dosi a les parets laterals produïda per la radiació secundària + terciària tenint en compte un gruix de plom de 15 cm, una intensitat de 0.1 μA i un factor d'ocupació T = 0.1.

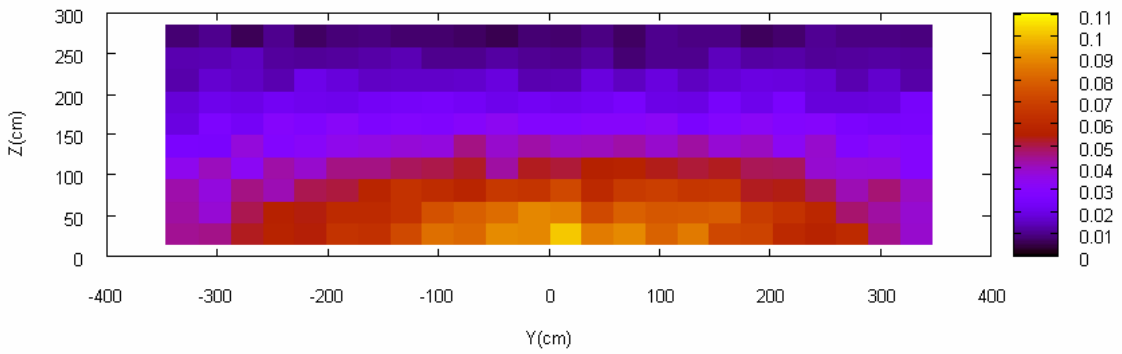

Figura 5.33. Distribució de H*(10) [mSv/any] per radiació secundària+terciària a la paret lateral D amb 15 cm de plom

5.6. Proposta final de blindatge amb PENELOPE

A la taula 5.8 es mostra un quadre resum amb la proposta final de blindatge segons els resultats obtinguts de les simulacions per Monte Carlo amb PENELOPE presentats en els apartats anteriors.

	BLINDATGE AMB RECOBRIMENTS DE FORMIGO I_{nom} = 1 µA		**BLINDATGE LOCAL DE PLOM I_{nom} = 0.1 µA**
	Parets laterals	**Sostre**	**Superfície lateral i tapa del cilindre**
Gruix [cm]	95	123	15

Taula 5.8. Proposta final de blindatge segons resultats obtinguts amb PENELOPE

6. Resolució amb la Norma DIN

S'ha realitzat el càlcul aplicant la fórmula general presentada en l'Equació 4.5. El factor de reducció (K) depèn de la component de radiació objecte d'estudi però no del material blindant, per tant el valor és el mateix per les dues configuracions per un mateix tipus de radiació. Es detalla el càlcul per la primera d'elles, el cas de la segona és anàleg però la intensitat utilitzada és 10 vegades inferior. Aquesta reducció manté invariant el valor de K en l'estudi de la radiació de fuites i no te efecte en aquest paràmetre per la radiació secundària.

Es recorda que el factor Z s'extreu de la Taula 2 de la referència [5] per al cas de radiació secundària i de la Figura 1 de la mateixa referència en el cas de la radiació de fuites.

El càlcul es realitza obtenint el gruix necessari per la radiació secundària i per als blancs 2 i 3 que produeixen la radiació de fuites. Dels resultats obtinguts per cada blanc s'extreu el gruix total necessari pel blindatge contra la radiació de fuites utilitzant el criteri de la Norma DIN presentat a la Taula 4.2 del present projecte, i aquest es compara amb l'obtingut per radiació secundària utilitzant el mateix procediment.

6.1. Càlcul del blindatge amb recobriments de formigó

- **Radiació secundària**

El factor de reducció (K) s'obté mitjançant l'Equació 4.7 on,

$K_e = 6.5 \cdot 10^{-3}$.Veure Figura 2 de la referència [5] pel cas d'electrons que incideixen en alumini.
$F_n = 0.125$ cm
$a_s = 370$ cm, per les parets A i C.
$a_s = 320$ cm, per les parets B i D.
$a_s = 300$ cm, pel sostre.

Tant els paràmetres de la fórmula general utilitzats com el gruix obtingut es mostren a la Taula 6.1.

	FORMIGÓ		
	Parets A i C	**Parets B i D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	37	37	37
ρ [g/cm^3]	2.3	2.3	2.3
Wa[mGy/setm]	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12
T	0.1	0.1	1
U	1	1	1
K	5.93E-11	7.93E-11	9.03E-11
q [mSv/mGy]	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**48**	**50**	**67**

Taula 6.1. Resultats de blindatge de formigó per la radiació secundària segons DIN

- **Radiació de fuites**

El factor de reducció (K) s'obté mitjançant l'Equació 4.8 on, $D_r = W = 3.3 \cdot 10^{12}$ mSv/setm per totes les parets i sostre i el valor D_0 es presenta a la Taula 6.2 per cadascun dels blancs que originen la radiació de fuites. Es recorda que aquesta magnitud és la taxa de dosi màxima produïda a les parets sense element blindant i s'ha obtingut per mitjà de PENELOPE.

	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
D_0 (B2) [mSv/setm]	1.03E+02	1.35E+02	1.18E+02	1.59E+02	9.76E+01
D_0 (B3) [mSv/setm]	4.21E+01	8.22E+01	6.33E+01	9.55E+01	9.05E+02

Taula 6.2. Valor de la D_0 per B2 i B3 a cadascuna de les parets i sostre

A les Taules 6.3 i 6.4 es mostren els paràmetres de la fórmula general i el gruix obtingut pels blancs 2 i 3 respectivament. Es recorda que l'energia dels electrons del feix en interaccionar amb els blancs mencionats són 1.9 MeV i 4 MeV respectivament. Aquestes són les energies considerades per extreure la Z de la Figura 1 de la referència [5].

	FORMIGÓ / B2				
	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5
ρ [g/cm^3]	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Wa [mGy/setm]	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12
T	0.1	0.1	0.1	0.1	1
U	1	1	1	1	1
K	3.12E-11	4.09E-11	3.58E-11	4.82E-11	2.96E-11
q [mSv/mGy]	1	1	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**52**	**54**	**53**	**55**	**70**

Taula 6.3. Resultats de blindatge de formigó per la radiació de fuites generada al B2 segons DIN

	FORMIGÓ / B3				
	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
ρ [g/cm^3]	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Wa [mGy/setm]	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12	3.30E+12
T	0.1	0.1	0.1	0.1	1
U	1	1	1	1	1
K	1.28E-11	2.49E-11	1.92E-11	2.89E-11	2.74E-10
q [mSv/mGy]	1	1	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**64**	**72**	**68**	**73**	**127**

Taula 6.4. Resultats de blindatge de formigó per la radiació de fuites generada al B3 segons DIN

Per trobar el gruix necessàri per la radiació de fuites total s'utilitza el criteri suggerit per la mateixa Norma presentat a la Taula 4.2 del present projecte.

Segons la diferència entre els espessors necessaris per blindar la contribució de cada blanc es planteja el reforçament del gruix superior tal com es mostra a la Taula 6.5. Les parets A i C necessiten un reforç de 0.2·CDR, les parets B i D de 0.1·CDR i el sostre no necessita reforç ja que la diferència d'espessors és superior a la CDR. La CDR (Z/ρ) utilitzada és la corresponent al blanc 3 per ser la més elevada amb un valor d'aproximadament 27 cm. El reforç s'ha arrodonit de manera conservadora.

	Paret A	Paret B	Paret C	Paret D	Sostre
Diferència d'espessors [cm]: B3-B2	12	18	15	18	57
Reforç	6	3	6	3	-
Gruix final per la radiació de fuites [cm]	**70**	**75**	**74**	**76**	**127**

Taula 6.5. Resultats de blindatge de formigó per la radiació de fuites total segons DIN

- **Resultat del conjunt de components de radiació.**

Comparant les Taules 6.1 i 6.5 que mostren el gruix per blindar la sala contra la radiació secundària i la radiació de fuites respectivament, s'observa que la radiació de fuites és la que necessita més gruix. A partir d'aquesta diferència d'espessors es realitza un càlcul anàleg al cas anterior mostrat a la Taula 6.6. En aquest cas totes les parets laterals necessiten un reforç de 0.1·CDR considerant la CDR més restrictiva que també correspon a la del blanc 3. El sostre no necessita reforç ja que la diferència també supera el valor d'aquesta CDR.

	Paret A	Paret B	Paret C	Paret D	Sostre
Diferència d'espessors [cm]: Rad. fuites – Rad. secundària	22	25	26	26	60
Reforç [cm]	3	3	3	3	-
Gruix final [cm]	**73**	**78**	**77**	**79**	**127**

Taula 6.6. Resultat final del gruix de formigó a les parets de la sala segons DIN.

6.2. Càlcul del blindatge local de plom

Es presenten directament els resultats obtinguts per la radiació secundària i pels blancs 2 i 3 a les Taules 6.7, 6.8 i 6.9 respectivament. Es recorda que per el cas del blindatge local la intensitat nominal es redueix un factor 10 (0.1 μA), per tant la carrega de treball (W) en aquest cas és d'un ordre de magnitud inferior.

- **Radiació secundària**

	PLOM		
	Parets A i C	**Parets B i D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	17	17	17
ρ [g/cm^3]	11.3	11.3	11.3
Wa [mGy/setm]	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11
T	0.1	0.1	1
U	1	1	1
K	5.93E-11	7.93E-11	9.03E-11
q [mSv/mGy]	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**3**	**3**	**5**

Taula 6.7. Resultats de blindatge de plom per la radiació secundària segons DIN

- **Radiació de fuites**

En el cas de la radiació de fuites, el factor de reducció (K) depèn de la carrega de treball (W) (que equival a D_r) i de D_0 segons l'Equació 4.8. Com les dues magnituds queden reduïdes amb un factor 10 degut a l'ajust de la intensitat, K es manté amb el mateix valor.

Les Taules 6.8 i 6.9 mostren els resultats pels blancs 2 i 3 en el cas del blindatge local de plom.

	PLOM / B2				
	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	42	42	42	42	42
ρ [g/cm^3]	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
Wa [mGy/setm]	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11
T	0.1	0.1	0.1	0.1	1
U	1	1	1	1	1
K	3.13E-11	4.09E-11	3.58E-11	4.82E-11	2.96E-11
q [mSv/mGy]	1	1	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**6**	**7**	**7**	**7**	**10**

Taula 6.8. Resultats de blindatge de plom per la radiació de fuites generada al B2 segons DIN

	PLOM / B3				
	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
Z [g/cm^2]	55	55	55	55	55
ρ [g/cm^3]	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
Wa [mGy/setm]	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11	3.30E+11
T	0.1	0.1	0.1	0.1	1
U	1	1	1	1	1
K	1.28E-11	2.49E-11	1.92E-11	2.89E-11	2.74E-10
q [mSv/mGy]	1	1	1	1	1
H [mSv/setm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Espessor [cm]	**7**	**8**	**7**	**8**	**18**

Taula 6.9. Resultats de blindatge de plom per la radiació de fuites generada al B3 segons DIN

De la mateixa manera que en els casos anteriors, per la diferència de gruixos entre els dos blancs es necessita afegir 0.3·CDR a totes les parets laterals sent la CDR la corresponent al blanc 3 amb un valor d'aproximadament 5 cm. El sostre no necessita reforç tal com es mostra a la Taula 6.10.

	Paret A	**Paret B**	**Paret C**	**Paret D**	**Sostre**
Diferència d'espessors [cm]: B3-B2	1	1	0	1	8
Reforç	1.5	1.5	1.5	1.5	-
Gruix final per la radiació de fuites [cm]	**8.5**	**9.5**	**8.5**	**9.5**	**18**

Taula 6.10. Resultats de blindatge de plom per la radiació de fuites total segons DIN

- **Resultat del conjunt de components de radiació.**

Comparant les Taules 6.7 i 6.10 que mostren els gruixos per blindar la sala contra la radiació secundària i la radiació de fuites respectivament, s'observa que la diferència d'espessors és més elevada que la CDR més restrictiva que és la que s'obté amb el blanc 3. Per tant, segons el criteri de la Norma DIN no és necessari cap reforç, amb el gruix obtingut per la radiació de fuites el sistema restaria blindat.

7. Comparativa PENELOPE-Norma DIN

A les Taules 7.1 i 7.2 es mostren els resultats d'espessor de blindatge (S) obtinguts amb PENELOPE i la Norma DIN per la configuració del blindatge de la sala amb recobriments addicionals de formigó i pel blindatge local de plom respectivament. També s'indiquen les CDRs calculades per cada metodologia ja que a partir d'aquestes es justifica les diferències obtingudes. Els resultats presentats a les parets laterals corresponen als obtinguts a la paret D per ser la més restrictiva i la que s'ha considerat en les simulacions amb PENELOPE. Encara que amb la Norma DIN s'han obtingut dades per tots els blancs només es presenten els casos que han estat simulats.

		PENELOPE				**DIN**	
		CDR_1	CDR_2	CDR_{eq}	**S**	CDR	**S**
P. laterals	Rad. secundària	15	24	28	**95**	16.08	**50**
	Rad. fuites (B2)	18	18	18	**50**	18.91	**55**
	Rad. fuites (B3)	20	20	20	**55**	27.17	**73**
Sostre	Rad. secundària	9	11	30	**100**	16.08	**67**
	Rad. fuites (B3)	25	25	25	**120**	27.17	**127**

Taula 7.1. Comparativa DIN-PENELOPE pel blindatge amb recobriments de formigó I = 1 μA
Gruixos indicats en cm.

		PENELOPE				**DIN**	
		CDR_1	CDR_2	CDR_{eq}	**S**	CDR	**S**
P. laterals	Rad. secundària	2	3.5	5	**10**	1.5	**3**
Sostre	Rad. secundària	0.5	1	4.5	**11**	1.5	**5**
	Rad. fuites (B3)	3	3	4.5	**15**	4.86	**18**

Taula 7.2. Comparativa DIN-PENELOPE pel blindatge local del plom I = 0.1 μA
Gruixos indicats en cm

Les principals diferències observades entre la Norma DIN i PENELOPE són degudes principalment al valor de la CDR que té en compte cada mètode:

- La CDR considerada a la norma DIN per la radiació secundària s'obté d'una taula on no hi ha dependència amb l'energia dels electrons emesos, i correspon a la CDR per fotons de 0.5 MV. Aquesta CDR s'aproxima a la CDR_1 o a la CDR_2 obtinguda amb PENELOPE que és considerablement més baixa que la CDR_{eq}. Per aquest motiu el gruix amb la Norma DIN en resulta sempre més baix.

- La CDR considerada a la norma DIN per la radiació de fuites s'obté de la mateixa figura que proposa dita Norma pel càlcul de la CDR per els raigs X de frenada generats en direcció al feix. Per electrons energètics, la direcció predominant dels fotons generats per bremsstrahlung és la mateixa que la del feix [4], per tant, la Norma DIN és conservadora amb la radiació de fuites. S'observa que les CDRs son més elevades en el cas de la Norma DIN pels blancs que originen la radiació de fuites, per tant, per aquest mètode també en resulten majors espessors per aquesta component.

A la Taula 7.3 es mostren els gruixos finals, considerant l'efecte global de totes les components de radiació.

	BLINDATGE AMB RECOBRIMENTS DE FORMIGO I_{nom} = 1 µA		**BLINDATGE LOCAL DE PLOM I_{nom} = 0.1 µA**
	Parets laterals	**Sostre**	**Superficie lateral i tapa del cilindre**
Gruix PENELOPE [cm]	95	123	15
Gruix DIN [cm]	79	127	18

Taula 7.3. Comparativa DIN-PENELOPE del gruix total

El gruix de formigó per les parets laterals de la sala obtingut amb PENELOPE és el degut a la radiació secundària com a contribució principal mentre que l'obtingut amb la Norma DIN és degut per les dues components però amb més contribució de la radiació de fuites. Aquesta discrepància es dona per la diferència de CDRs considerades.
En el cas del sostre, la radiació de fuites és la component que més gruix necessita i ja s'ha comentat abans que la Norma DIN és conservadora en aquest cas, per tant, el gruix al sostre

es preveu més elevat segons els càlculs amb dita Norma. En el cas del blindatge local, el gruix trobat al sostre s'utilitza en tot el cilindre. (Veure Apartat 5.6)

8. Pressupost

Per fer el pressupost del present projecte es consideren els recursos humans i els recursos materials emprats per la seva realització.

- **Costos de recursos humans**

Com a recursos humans es quantifica el treball portat a terme pel personal que ha participat en el projecte tal com es detalla a la Taula 8.1

Descripció	U.M	Preu [€ / U.M]	Quantitat [U.M]	Total [€]
Treball enginyer júnior	Hores	10	960	9600
Supervisió de dos tutors	Hores	2 x 50	100	10000
			TOTAL	19600

Taula 8.1 Costos de recursos humans

- **Costos de recursos materials**

El projecte desenvolupat es tracta d'un projecte d'investigació i els recursos materials necessaris per dur-lo a terme són:

- Un ordinador per poder realitzar les simulacions.
- La llicencia de les eines utilitzades. En aquest cas el software emprat (PENELOPE) és gratuït i només es comptabilitza la llicència de les Normes.
- Tarificació de connexió a un servidor de característiques similars al Cluster Argos amb 11 nodes de 16 GB de RAM cadascún.

A la Taula 8.2 es detallen els costos materials.

	Descripció	U.M	Preu [€ / U.M]	Quantitat [U.M]	Total [€]
MATERIAL INFORMÀTIC	**Amortització ordinador**	Hores	0.4	960	384
LLICÈNCIA NORMES	**Norma NCRP 144**	U	59	1	59
	Norma DIN 6847	U	99	1	99
CONNEXIÓ CLUSTER	**Hores de computació**	Hores	0.5	500	250
				TOTAL	792

Taula 8.2 Costos dels recursos materials

- **Costos totals**

Tal com es mostra a la Taula 8.3 els cost total del projecte correspon a la suma del cost de recursos humans amb el material, tenint en compte un IVA del 18%.

CONCEPTE	FACTURACIÓ [€]
Recursos Humans	19600
Recursos Materials	792
TOTAL sense IVA	20392
IVA (18%)	3670.56
TOTAL	24062.56

Taula 8.3 Cost total del projecte

9. Estudi d'impacte ambiental

En el projecte realitzat s'estudia la dosi produïda pel Microtró en la seva posada a punt i la manera de minimitzar-la fins els límits que marca la normativa. És per tant en si mateix, un estudi per reduir l'impacte que les radiacions ionitzats provoquen a les persones i l'entorn.

Encara que la quantificació de productes d'activació produïts en l'operació del Microtró així com les emissions radioactives en cas d'accident estan fora de l'abast d'aquest projecte; de manera qualitativa, pel que fa a l'impacte ambiental provocat en l'operació d'acceleradors de partícules, s'han de tenir en compte dos fonts de radiació [6]:

- La radiació existent quan l'accelerador està en operació en cas d'accident o funcionament anormal. Aquesta depèn del tipus de partícules accelerades i de la seva energia; i està composada tan per la radiació directa del feix com per la dispersada.

- La radiació induïda present també quan l'accelerador no es troba en funcionament degut a la desintegració d'isòtops activats. Aquest tipus de radiació es troba en els components de l'accelerador i sala d'operació i pot provocar tres possibles fonts de contaminació ambiental:

    - Materials sòlids activats: Els components de l'accelerador i elements auxiliars així com el blindatge poden quedar activats, per la qual cosa s'han de controlar quan es traslladen fora de la sala de l'accelerador per treball de manteniment o per desmantellament.

    - Gasos i líquids radioactius: Els fluids, com l'aire i aigua presents en l'espai on es troba l'accelerador també poden quedar activats i tenen més facilitat d'expandir-se que els materials sòlids.

L'activació de l'aire és la més important en quant a efectes d'exposició del públic. Aquesta es produïrà només quan el Microtró funcioni a més de 10 MeV d'energia, a partir de la qual es comencen a produïr foto-neutrons. Amb 12 MeV d'energia no s'espera una producció elevada de neutrons, en concret la taxa de producció de neutrons correspon a aproximadament 0.1 neutrons/(s · kW) [9]. Els nuclis radioactius que es formen a partir de molècules d'aire més importants en quant a contaminació ambiental són: ^{37}Be, ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{41}Ar. Per altra banda, també es produeix ozó (O_3) com a resultat de la interacció d'electrons

amb molècules d'oxigen (O_2). Aquests isòtops són de vida molt curta i establint una taxa de ventilació de 10 renovacions/hora durant el funcionament de la màquina seria suficient.

Conclusions

Les simulacions basades en el mètode de Monte Carlo amb el codi PENELOPE han permès obtenir resultats de les distribucions de taxa de dosi produïda per les emissions radioactives del Microtró tenint en compte geometries que impliquen grans distàncies i materials de gruix considerable, càlcul extremadament complicat amb estimacions semianalítiques. En base d'aquests resultats s'han considerat dos esquemes de blindatge (blindatge estructural i blindatge local) i s'ha definit el gruix del blindatge necessari per a assegurar la protecció radiològica del personal i de l'entorn en la fase de proves i posta en marxa del Microtró.

Mitjançant un model simplificat del capçal del Microtró s'han obtingut noves dades, fins el moment inexistents, de la distribució de taxa de dosi produïda per la radiació de fuites originada a l'interior del RTM per interacció d'electrons amb els seus components interns. Els resultats contemplen l'efecte autoblindant d'aquests.

En el primer cas, on s'analitza un blindatge estructural consistent en recobriments addicionals de formigó a les parets existents a la sala, el càlcul directe considerant el gruix total que seria necessari no ha estat possible en el cas del sostre degut a l'elevat temps de computació necessari, i s'ha optat per aplicar el concepte de capa decimorreductora d'equilibri. S'ha comprovat la validesa d'aquesta eina realitzant els dos tipus de càlculs en les parets laterals, i s'ha posat de manifest que utilitzar com a única referència el valor de la primera capa decimorreductora conduiria a subestimar considerablement el blindatge necessari.

En el segon cas, on s'estudia el blindatge local format per una cambra cilíndrica de plom que envolta el capçal de l'accelerador, s'ha plantejat l'alternativa de reduïr un factor 10 la intensitat nominal com a solució a la limitació existent d'espessor degut al pes associat a blindatges de plom de gruix elevat.

Una de les diferències importants observades entre els resultats obtinguts amb el codi de simulació PENELOPE i la Norma DIN 6847 és la discrepància amb les CDRs considerades.

Per la component de radiació secundària (secundària + terciària amb PENELOPE), la CDR contemplada per la Norma DIN 6847 s'aproxima al valor de la primera CDR obtinguda amb PENELOPE, per això els espessors obtinguts mitjançant la Norma DIN són inferiors.

Agraïments

Vull agraïr als supervisors del projecte Youri Koubychine i Maria Amor Duch la seva atenció constant durant la realització del treball.

A en Vasily Shvedunov i Francesc Verdera per les seves aportacions i comentaris.

També agrair als companys de titulació i especialitat Pau Bermúdez i Emili Martínez el seu suport constant, els seus ànims i la seva ajuda al llarg dels estudis universitaris i de la realització d'aquest projecte.

Finalment, vull agraïr al Consell de Seguretat Nuclear i a la Càtedra Argos el seu suport econòmic en la primera convocatòria de l'any 2010.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[1] Yu.A. Kubyshin et al. *Current Status of the 12 MeV UPC Race-Track Microtron.* In: Proceedings of the Particle Accelerator Conference PAC-2009 (4-8 May, Vancouver), pp. 2775-2777

[2] M. A. Duch, Yu. Kubyshin, V. Shvedunov. *Calculations of the parasitic radiation generated by the 12 MeV RTM for IORT. Technical task description*. Internal report T-11-01, INTE, 2011

[3] X.O. Aramburu, ed. J. J. Bisbal, ed. *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos.* Vol. 1, Edicions UPC 1994, pp 167-209, 289-348

[4] P.Coll, *Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica.* Vol 1. Barcelona, Edicions UPC, 1990, pp 21-104,

[5] DIN, *Medical electron accelerators. Part 2: Radiation Protection rules for installation*. DIN 6847 (1977), Deutsches Institut für Normung.

[6] NCRP, *Radiation protection for particle accelerator facilities*. NCRP Report 144 (2005), National Council on Radiation Protection and Measurements

[7] ICRP Publication 33: *Protection Against Ionizing Radiation form External Sources Used in Medicine.* Volume 9 Nº 1, 1982

[8] F. Salvat, J. Fernández- Varea, J. Sempau. *PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon Transport*, NEA-OECD, (2008).

[9] IAEA, *Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators*. Technical Reports Series No. 188. STI/DOC/010/188, 1979, ISBN 92-0-125179-3.

Bibliografia complementària

[10] M.A. Àvila-Rodriguez, P.M. De Luca Jr, T.D. Bohm, *Simulation of Medical Electron Linac Bremsstrahlung Beam Transport in Typical Shielding Materials*, In: Radiation Protection Dosimetry (2005), Vol. 116, No. 1-4, pp. 547-552

[11] J.Ródenas, A.León, G.Verdú, *Application of the Monte Carlo Method to Accelerator Shielding Analysis. A new estimation of the Tenth-Value Thickness for X-Rays in Medical Linear Accelerators.* In: Proceedings of the Particle Accelerator Conference PAC-1999 (New York), pp. 2534-2536

Annexes

ANNEX A: ARXIUS D'ENTRADA EN PENELOPE _____81

A.1 Creació del PSF 1 81

A.1.1 Arxius d'entrada per la radiació secundària + terciària 81

A.1.2 Arxius d'entrada per la radiació de fuites 83

A.2 Creació del PSF 2 98

A.2.1 Radiació secundària + terciària. Blindatge amb recobriments de formigó .. 99

A.2.2 Radiació de fuites. Blindatge amb recobriments de formigó. 101

A.2.3 Radiació secundària + terciària. Blindatge local de plom 103

A.2.4 Radiació de fuites. Blindatge local de plom 106

A.3 Càlcul de taxa de dosi 109

A.3.1 Radiació secundària + terciària. Blindatge amb recobriments de formigó .. 109

A.3.2 Radiació de fuites. Blindatge amb recobriments de formigó 112

A.3.3 Radiació secundària + terciària. Blindatge local de plom 114

A.3.4 Radiació de fuites. Blindatge local de plom 117

ANNEX B. MAPES DE DISTRIBUCIÓ DE TAXA DE DOSI _____121

B.1 Distribucions a 1 m de la cambra de buit per la radiació secundària..... 121

B.2 Distribucions a 1 m de la cambra de buit per la radiació de fuites 122

B.3. Distribucions a les parets sense blindatge per la radiació de fuites.....127

Annex A. Arxius d'entrada en PENELOPE

Es presenten els exemples més significatius de l'arxiu principal i l'arxiu de definició de la geometria utilitzats per realitzar les simulacions.

L'últim bloc (*job properties*) es manté invariant durant totes les simulacions, per tant només es presenta en el primer *input*. De la mateixa manera, només s'indiquen les definicions dels paràmetres en el primer exemple.

A.1 Creació del PSF 1

A.1.1 Arxius d'entrada per la radiació secundaria + terciaria

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Creació del PSF 1 generat per interacció d'electrons de 12 MeV
amb la Copa de Faraday.
       .

       >>>>>>>> Source definition.
SKPAR  1       [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 12e6            [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 9                              [Coordinates of the source]
SBOX   0.3545 0.3545 0.0                      [Source box dimensions]
SCONE  180 0 0                         [Conical beam; angles in deg]
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME formigo.mat                   [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 1e5 3e4 1e5 0.2 0.2 1e5 3e3         [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME Al.mat
MSIMPA 12e4 3e4 12e3 0.2 0.2 12e4 3e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e5 12e4 5e5 0.2 0.2 5e5 12e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e5 12e4 5e5 0.2 0.2 5e5 12e3
       .

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF1st.geo                    [Geometry file, up to 20 chars]
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 12e6 20 1 0          [E-window, no. of bins, IPSF, IDCUT]
IDPSF  PSF1stform.dat                  [Phase-space file name, 20 chars]
IDBODY 4                       [Active body; one line for each body]
       .

       >>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dmp              [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump2.dmp                 [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60                                  [Dumping period, in sec]
```

```
       .
NSIMSH 2e99                        [Desired number of simulated showers]
TIME   3e4                            [Allotted simulation time, in sec]
       .

END                                      [Ends the reading of input data]
```

- **Definició de la geometria: PSF1st.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)  plane Z=5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 5.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.000000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 2.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)  plane Z=9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)  plane Z=90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
```

```
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   4)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.1.2 Arxius d'entrada per la radiació de fuites.

Es presenten com exemple els arxius d'entrada per el blanc 2.

- **Arxiu principal d'entrada *(input)***

```
TITLE  Creació PSF 1 generat per la contribució del blanc 2 a la radiació
de fuites
       .

       >>>>>>>> Source definition.
SKPAR  1
SENERG 1.9e6
SPOSIT 0 2.8 58
SBOX   0.5 1 0
SCONE  180 0 0
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Coure.mat
MSIMPA 1e4 1e3 1e4 0.2 0.2 1e2 1e2
MFNAME Alumini.mat
MSIMPA 1e6 1e6 1e6 0.2 0.2 1e5 1e5
MFNAME neodynium_magnet.mat
MSIMPA 1e4 1e3 1e4 0.2 0.2 1e2 1e2
MFNAME AISI_304L.mat
MSIMPA 1e4 1e3 1e4 0.2 0.2 1e2 1e2
MFNAME AL_7075T6.mat
MSIMPA 1e4 1e3 1e4 0.2 0.2 1e2 1e2
MFNAME Titani.mat
MSIMPA 1e6 1e6 1e6 0.2 0.2 1e5 1e5
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e3 1e4 0.2 0.2 1e2 1e2
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e5 1e5 0.2 0.2 1e4 1e4

       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF1fuites.geo
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 1.9e6 20 1 0
IDPSF  PSF1blanc2.dat
IDBODY 49
       .
```

- **Definició de la geometria: PSF1fuites.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=53.45
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 53.45000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=53.55
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 53.55000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3) X=0.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) X=-0.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5) Y=2.7, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-2.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6) Y=4.7, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-4.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)  coure
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=48
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 48.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)  plane Z=58
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 58.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 0.400000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 3.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   2)
MATERIAL(   0)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10)  plane Z=48.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 48.30000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11)  plane Z=49.34
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 49.34000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.700000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 1.700000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 3.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   3)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)  plane Z=49.72
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 49.72000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14)  plane Z=51.96
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 51.96000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  15)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 1.900000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 1.900000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 3.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   4)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  16)  plane Z=52.34
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 52.34000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  17)  plane Z=54.58
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 54.58000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   5)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  17), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  18)  plane Z=54.96
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 54.96000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  19)  plane Z=57.2
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 57.20000000000000E+00,   0)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   6)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  18), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  20)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.500000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 2.500000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 3.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   7)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  20), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
BODY    (   2)
BODY    (   3)
BODY    (   4)
BODY    (   5)
BODY    (   6)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  21)  plane Z=37.67
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 37.67000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  22)  plane Z=38.67
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 38.67000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  23) Y=0.1, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-0.100000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  24) Y=2.1, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-2.100000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   8)
MATERIAL(   2)
SURFACE (  21), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  24), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  25)  plane Z=61.83
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 61.83000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  26)  plane Z=69.03
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 69.03000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  27) Y=7.4, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
```

```
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-7.400000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  28) Y=-7.4, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 7.400000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  29) X=0.6, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-0.600000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  30) X=-0.6, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 0.600000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   9)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  31)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.000000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 69.030000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  10)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  32)  plane Z=62.18
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 62.180000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  33)  plane Z=63.18
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 63.180000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  34) X=2.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-2.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  11)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  32), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  35) X=-2.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 2.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  12)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  32), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  36)  plane Z=64.68
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 64.68000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  37)  plane Z=65.68
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 65.68000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  13)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  37), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  14)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  37), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  35), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  38)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 6.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 6.400000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 69.03000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  39) X=3, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-3.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  15)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  38), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  40) X=-3, limiting plane
```

```
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 3.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  16)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  38), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  41)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 6.200000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 6.200000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 69.03000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  42) X=4, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-4.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  43)  plane Z=69.23
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 69.23000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  17)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  42), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  44) X=-4, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 4.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  18)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  44), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  45)  plane Z=67.53
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 67.53000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  19)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  20)
MATERIAL(   3)
```

```
SURFACE (  45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  27), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  28), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  46)  plane Z=66.03
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 66.03000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  47) Y=9.2, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-9.200000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  48) Y=-9.2, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 9.200000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  21)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  46), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  47), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  48), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  49) X=5.8, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-5.800000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  50) X=-5.8, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 5.800000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  22)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  47), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  48), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  50), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  51)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 9.200000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 9.200000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 69.03000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  23)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  51), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  26), SIDE POINTER=(+1)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  52)  plane Z=37.67
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 37.67000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  53)  plane Z=30.47
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  54) Y=5.9, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-5.900000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  55) Y=-8.9, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 8.900000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  24)
MATERIAL(   0)  buit
SURFACE (  52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  56)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 7.400000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=(-1.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  25)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  56), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  57)  plane Z=37.32
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 37.32000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  58)  plane Z=36.32
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 36.32000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  26)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  58), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  27)
MATERIAL(   3)
```

```
SURFACE (  57), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  58), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  35), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  59)  plane Z=34.82
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 34.82000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  60)  plane Z=33.82
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 33.82000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  28)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  59), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  60), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  29)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  59), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  60), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  35), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  61)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 6.400000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 6.400000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=(-1.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  30)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  56), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  61), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  31)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  56), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  61), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  62)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 6.200000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 6.200000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
```

```
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=(-1.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  63)  plane Z=30.27
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 30.27000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  32)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  62), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  42), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  63), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  33)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  62), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  44), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  63), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  64)  plane Z=31.97
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 31.97000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  34)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  64), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  29), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  35)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  64), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  54), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  55), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  65)  plane Z=33.47
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 33.47000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  66) Y=-10,7, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 10.70000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  67) Y=7.7, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-7.700000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  36)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  65), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  66), SIDE POINTER=(+1)
```

```
SURFACE (  67), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  40), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  37)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  65), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  66), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  67), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  50), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  68)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 9.200000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 9.200000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 30.47000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=(-1.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  38)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  68), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  53), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  50), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  69)  plane Z=17.75
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 17.75000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  70)  plane Z=81.75
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 81.75000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  71) X=7.2, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-7.200000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  72) Y=12.25, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-12.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  73) Y=-12.25, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 12.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  39)
MATERIAL(   5)
SURFACE (  69), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  70), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  49), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  71), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  72), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  73), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  74)  plane Z=16.85
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
```

```
Z-SHIFT=( 16.85000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  75)  plane Z=16.25
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 16.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  76)  plane Z=10.21
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 10.21000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  77)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.500000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 0.500000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 9.200000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  40)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  77), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  76), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  74), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  78)  plane Z=16.85
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 16.85000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  79)  plane Z=82.65
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 82.65000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  80) X=-13.2, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 13.20000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  41)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  78), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  79), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  71), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  80), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  72), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  73), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   7)
BODY    (   8)
BODY    (   9)
BODY    (  10)
BODY    (  11)
BODY    (  12)
BODY    (  13)
BODY    (  14)
BODY    (  15)
BODY    (  16)
BODY    (  17)
BODY    (  18)
BODY    (  19)
BODY    (  20)
BODY    (  21)
BODY    (  22)
BODY    (  23)
BODY    (  24)
BODY    (  25)
```

```
BODY    (  26)
BODY    (  27)
BODY    (  28)
BODY    (  29)
BODY    (  30)
BODY    (  31)
BODY    (  32)
BODY    (  33)
BODY    (  34)
BODY    (  35)
BODY    (  36)
BODY    (  37)
BODY    (  38)
BODY    (  39)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  81)  plane Z=83.25
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 83.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  82) X=7.8, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-7.800000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  83) X=-13.8, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 13.80000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  84) Y=-12.85, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 12.85000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  42)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  77), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  75), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  81), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  82), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  83), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  72), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  84), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (  41)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  85)  plane Z=13.25
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 13.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  86)  plane Z=86.25
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 86.25000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  87) X=10.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-10.50000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  88) X=-16.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 16.50000000000000E+00,   0)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  89) Y=13.85, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-13.85000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  90)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 6.250000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 6.250000000000000E+00,   0)
  THETA=( 90.00000000000000E+00,   0)
    PHI=( 90.00000000000000E+00,   0)
Z-SHIFT=( 55.20000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 13.85000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  91) Y=13.05, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-13.05000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  43)
MATERIAL(   0)
SURFACE (  90), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  91), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  89), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  44)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  85), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  86), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  87), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  88), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  89), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  72), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (  43)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  92)  plane Z=10.208
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 10.20800000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  45)
MATERIAL(   6)
SURFACE (  77), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  76), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  92), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  93)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.600000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 0.600000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 9.200000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  46)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  93), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  77), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  92), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  75), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (  47)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  79), SIDE POINTER=(+1)
```

```
SURFACE (  81), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  77), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  94)  plane Z=9.208
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.208000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  95)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  96)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  48)
MATERIAL(   7)
SURFACE (  96), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  94), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  95), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (  42)
MODULE  (  44)
BODY    (  45)
BODY    (  46)
BODY    (  47)
BODY    (  40)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  97)  plane Z=9.108
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.108000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  98)  plane Z=90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  99)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (  49)
MATERIAL(   8)
SURFACE (  99), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  97), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  98), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (  48)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.2 Creació del PSF 2

En el cas de la radiació secundària + terciària es mostren els arxius d'entrada utilitzats per l'estudi de les parets laterals, i en el cas de la radiació de fuites, els utilitzats pel càlcul al sostre. Els esquemes de creació són análegs, només canvia l'orientació del PSF 2.

A.2.1 Radiació secundària + terciària. Blindatge amb recobriments de formigó

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Creació del PSF 2 a les parets laterals per efecte de la  radiació
secundària + terciària en l'estudi del blindatge amb recobriements de
formigó
       .
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF1stform.dat
IPSPLI 5
EPMAX  12e6
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e4 1e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e4 1e3
MFNAME formigo.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e4 1e3
       .

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF2lateral.geo
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 12e6 20 1 0
IDPSF  PSF2lateral.dat
IDBODY 5
       .
```

- **Definició de la geometria: PSF2lateral.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 5.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)  plane Z=90.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=294
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 294.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8) X=314, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-314.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9) X=-199.9, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 199.9000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10) Y=364, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-364.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) Y=-364, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 364.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12)  plane Z=-6
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=(-6.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14) X=320, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-320.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

```
SURFACE (  15) Y=370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  16) Y=-370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  17) X=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   2)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  17), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.2.2 Radiació de fuites. Blindatge amb recobriments de formigó

Es presenten els arxius d'entrada utilitzat pel blanc 3.

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE Creació del PSF 2 al sotre per efecte de la radiació de fuites
generada al blanc 3 en l'estudi del blindatge amb recobriemnts de formigó
       .

       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF1blanc3.dat
IPSPLI 5
EPMAX  4e6
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e5 1e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e5 1e3
       .
```

```
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF2fsostre.geo
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 4e6 20 1 0
IDPSF  PSF2b3sostre.dat
IDBODY 4
       .
```

- **Definició de la geometria: PSF2fsostre.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=9.208
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.208000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)  plane Z=9.108
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.108000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)  plane Z=90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)  plane Z=149.9
```

```
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 149.9000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9) X=317, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-317.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10) X=-323, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 323.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) Y=370.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12) Y=-369.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 369.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)  plane Z=150
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 150.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   2)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.2.3 Radiació secundària + terciària. Blindatge local de plom

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Creació del PSF 2 per les parets laterals per efecte de la radiació
secundària + terciària en l'estudi del blindatge local de plom amb un
gruix de 15 cm
       .
```

```
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF1stpb.dat
IPSPLI 2000
EPMAX  12e6
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e3 5e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e3 5e3
MFNAME plom.mat
MSIMPA 5e5 5e4 5e5 0.2 0.2 5e4 5e3
       .

       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF2stlateral15.geo
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 12e6 20 1 0
IDPSF  PSF2stlateral15.dat
IDBODY 5
       .
```

- **Definició de la geometria PSF2stlateral15.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 5.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)  plane Z=90.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
```

```
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=105
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 105.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 40.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 40.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10) X=100, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-100.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) X=-100, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 100.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12) Y=370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13) Y=-370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14) X=-100.1, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 100.1000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   2)
```

```
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.2.4 Radiació de fuites. Blindatge local de plom

Es presenten els arxius d'entrada utilitzat pel blanc 3.

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Creació del PSF2 pel sotre per efecte de la radiació de fuites
generada al blanc 3 en l'estudi del blindatge local de plom amb un gruix
de 15 cm
       .

       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF1blanc3.dat
IPSPLI 100
EPMAX  4e6
       .
       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e3 1e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e3 1e3
MFNAME plom.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e5 1e4

       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN PSF2sostre15.geo
DSMAX  4 0.5
       .

       >>>>>>>> Impact detector.
IMPDET 0.0 4e6 20 1 0
IDPSF  PSF2b3sostre15.dat
IDBODY 6
      .
```

- **Definició de la geometria: PSF2sostre15.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=9.208
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.208000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=89.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 89.90000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3)   CYLINDER
```

```
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 24.90000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4)  plane Z=9.108
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 9.108000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5)  plane Z=90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 90.00000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 25.00000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 5.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)   CYLINDER
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 40.00000000000000E+00,   0)
Y-SCALE=( 40.00000000000000E+00,   0)
X-SHIFT=(-3.000000000000000E+00,   0)
Y-SHIFT=( 0.500000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10)  plane Z=95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 105.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
```

```
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) X=200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12) X=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13) Y=200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14) Y=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  15)  plane Z=109
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 109.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  16)  plane Z=109.1
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 109.1000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   6)
MATERIAL(   2)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   5)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.3 Càlcul de taxa de dosi

A.3.1 Radiació secundària+terciària. Blindatge amb recobriments de formigó

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Càlcul de la taxa de dosi a la paret lateral D per efecte de la
radiació secundària + terciària en l'estudi del blindatge amb recobriments
de formigó amb un gruix de 100 cm

       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF2stlateral.dat
IPSPLI 900000000
EPMAX  12e6
       .

       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e4 1e4
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e5 1e4 1e5 0.2 0.2 1e5 1e4
MFNAME formigo.mat
MSIMPA 12e6 1e5 12e6 0.2 0.2 1e5 1e5
MFNAME ICRU.mat
MSIMPA 1e5 1e5 1e5 0.2 0.2 1e5 1e5

       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN dosiD100.geo
DSMAX  4 0.05
DSMAX  5 0.1
       .
       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX   -321.5 -320.5       [X coordinates of the enclosure vertices]
GRIDY   -360 360            [Y coordinates of the enclosure vertices]
GRIDZ   0 300               [Z coordinates of the enclosure vertices]
GRIDBN  1 24 10                                     [Numbers of bins]
       .
```

- **Definició de la geometria dosiD100.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=-6
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=(-6.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3) Y=370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) Y=-370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
```

```
     A0=( 370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5) X=-199.9, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 199.9000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6) X=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7) Y=364, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-364.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8) Y=-364, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 364.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10)  plane Z=294
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 294.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) X=-220, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 220.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12)  plane Z=-6
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=(-6.000000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14) X=-320, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
```

```
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 320.0000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  15) Y=370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.0000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  16) Y=-370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 370.0000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   1)
BODY    (   2)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  17) X=-320.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 320.5000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  17), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  18) X=-321.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 321.5000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  18), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  19) X=-330, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 330.0000000000000E+00,   0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   6)
MATERIAL(   4)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(+1)
```

```
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  19), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  16), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   5)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.3.2 Radiació de fuites. Blindatge amb recobriments de formigó

Es presenten els arxius d'entrada utilitzat pel blanc 3.

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Càlcul de la taxa de dosi al sostre per efecte de la radiació de
fuites generada al blanc 3 en l'estudi del blindatge amb recobriments de
formigó amb un gruix de 100 cm.
       .
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF2b3sostre.dat
IPSPLI 900000000
EPMAX  4e6
       .
       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e4 1e4
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e4 1e4 5e4 0.2 0.2 5e4 1e4
MFNAME formigo.mat
MSIMPA 4e6 5e4 4e6 0.2 0.2 1e5 5e4
MFNAME ICRU.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e4 5e4

       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN dosiS100.geo
DSMAX  4 0.05
DSMAX  5 0.1
       .
       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX   -318 312
GRIDY   -359.5 360.5
GRIDZ   300.5 301.5
GRIDBN  21 24 1
       .
```

- **Definició de la geometria dosiS100.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=149.9
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 149.9000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2) X=317, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-317.0000000000000E+00,   0)
```

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3) X=-323, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 323.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) Y=370.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5) Y=-369.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 369.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)  plane Z=150
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 150.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=200
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9)  plane Z=300.5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
```

```
MATERIAL(   4)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10)  plane Z=301.5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 301.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   4)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11)  plane Z=310
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 310.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   6)
MATERIAL(   4)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(-1)
MODULE  (   5)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.3.3 Radiació secundària + terciària. Blindatge local de plom.

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Càlcul de la taxa de dosi a les parets laterals per efecte de la
radiació secundària + terciària en l'estudi del blindatge local de plom
amb un gruix de 15 cm.
       .
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF2stlateral15.dat
IPSPLI 900000000
EPMAX  12e6
       .
       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e3 5e3
MFNAME aire.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e3 5e3
MFNAME ICRU.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e3 1e3
```

```
       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN dosi_D.geo
DSMAX  3 0.05
DSMAX  4 0.1
       .
       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX   -321.5 -320.5
GRIDY   -360 360
GRIDZ   0 300
GRIDBN  1 24 10
       .
```

- **Definició de la geometria dosi_D.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3) X=-100, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 100.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) X=-100.1, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 100.1000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5) Y=370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6) Y=-370, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 370.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7) X=-320, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 320.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
```

```
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8) X=-320.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 320.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9) X=-321.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 321.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10) X=-330, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 330.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   3)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

A.3.4 Radiació de fuites. Blindatge local de plom

Es presenten els arxius d'entrada utilitzat pel blanc 3.

- **Arxiu principal d'entrada (*input*)**

```
TITLE  Càlcul de la taxa de dosi al sostre per efecte de la radiació de
fuites generada al blanc 3 en l'estudi del blindatge local de plom amb un
gruix de 15 cm.

       .
       >>>>>>>> Input phase-space file (psf)
IPSFN  PSF2b3sostre15.dat
IPSPLI 900000000
EPMAX  4e6
       .
       >>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e4 1e4
MFNAME aire.mat
MSIMPA 1e4 1e4 1e4 0.2 0.2 1e4 1e4
MFNAME ICRU.mat
MSIMPA 5e4 5e4 5e4 0.2 0.2 5e4 5e4

       .
       >>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN Dosisostre.geo
DSMAX  3 0.05
DSMAX  4 0.1
       .
       >>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX   -318 312
GRIDY   -359.5 360.5
GRIDZ   300.5 301.5
GRIDBN  21 24 1
       .
```

- **Definició de la geometria: Dosisostre.geo**

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   1)  plane Z=109
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 109.0000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   2) X=200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   3) X=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   4) Y=200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
```

```
     A0=(-200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   5) Y=-200, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 200.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   6)  plane Z=109.1
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 109.1000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (   1)
MATERIAL(   1)
SURFACE (   6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   5), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   7)  plane Z=300
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.0000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   8) X=317, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-317.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (   9) X=-323, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AX=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 323.0000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  10) Y=370.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=(-370.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  11) Y=-369.5, limiting plane
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
     AY=( 1.000000000000000E+00,   0)
     A0=( 369.5000000000000E+00,   0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   2)
MATERIAL(   2)
SURFACE (   7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (   1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  12)  plane Z=300.5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 300.5000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   3)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
```

```
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   2)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  13)  plane Z=301.5
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 301.5000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   4)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   3)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE (  14)  plane Z=310
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 310.0000000000000E+00,   0)              (DEFAULT=0.0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  (   5)
MATERIAL(   3)
SURFACE (  14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (   9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (  10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (   1), SIDE POINTER=(+1)
MODULE  (   4)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

ANNEX B. Mapes de distribució de taxa de dosi

B.1 Distribucions obtingudes a 1 m de la cambra de buit per la radiació secundària

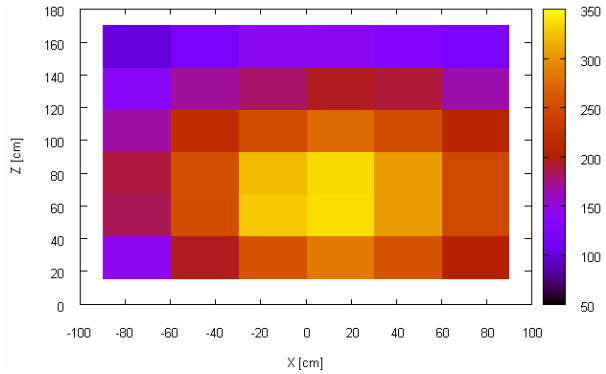

Figura B.1. Distribució de H*(10) [mSv/h] per **radiació secundària**. Pla paral·lel a la **Paret A**

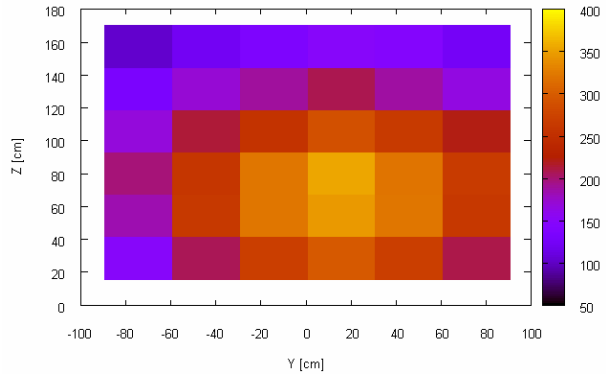

Figura B.2. Distribució de H*(10) [mSv/h] per **radiació secundària**. Pla paral·lel a la **Paret B**

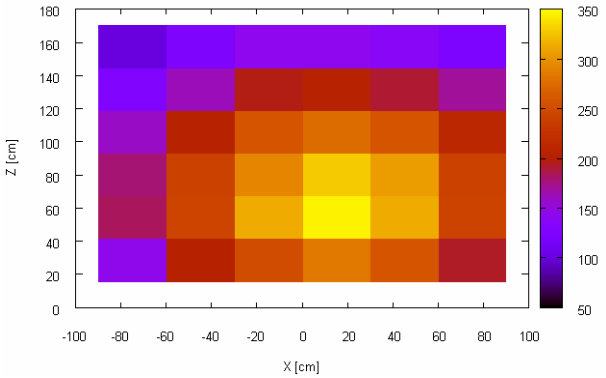

Figura B.3. Distribució de H*(10) [mSv/h] per **radiació secundària**. Pla paral·lel a la **Paret C**

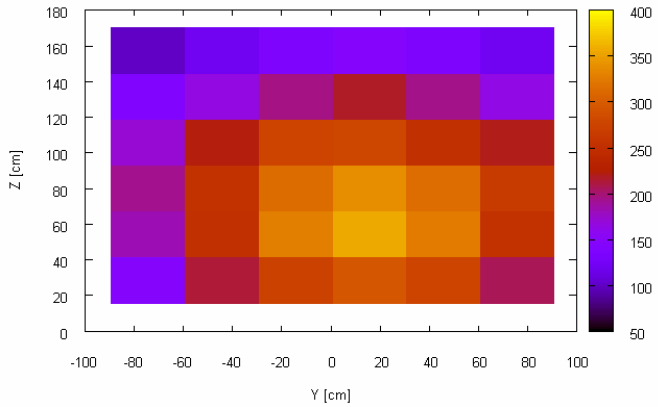

Figura B.4. Distribució de H*(10) [mSv/h] per **radiació secundària**. Pla paral·lel a la **Paret D**

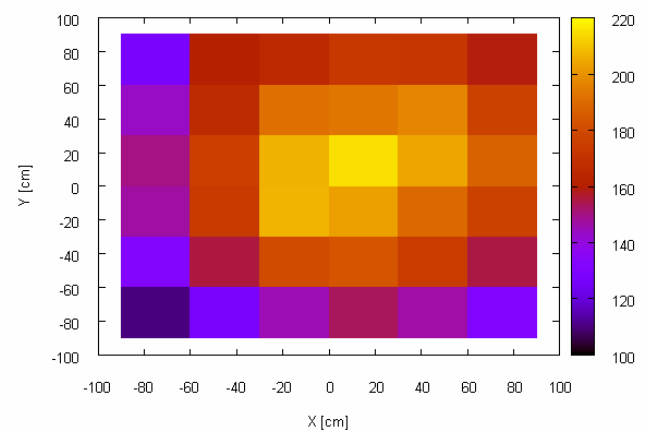

Figura B.5. Distribució de H*(10) [mSv/h] per **radiació secundària**. Pla paral·lel al **Sostre**

B.2 Distribució obtingudes a 1 m de la cambra de buit per la radiació de fuites

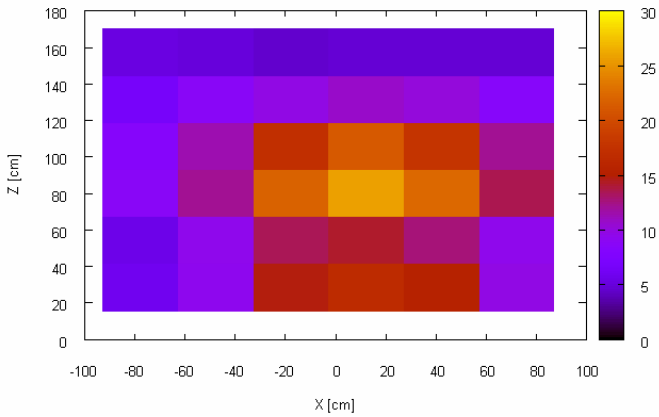

Figura B.6. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 2**. Pla paral·lel a la **Paret A**

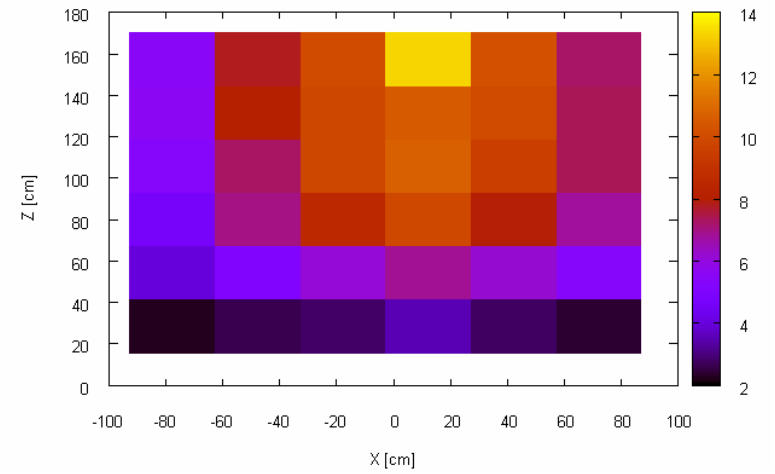

Figura B.7. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 3**. Pla paral·lel a la **Paret A**

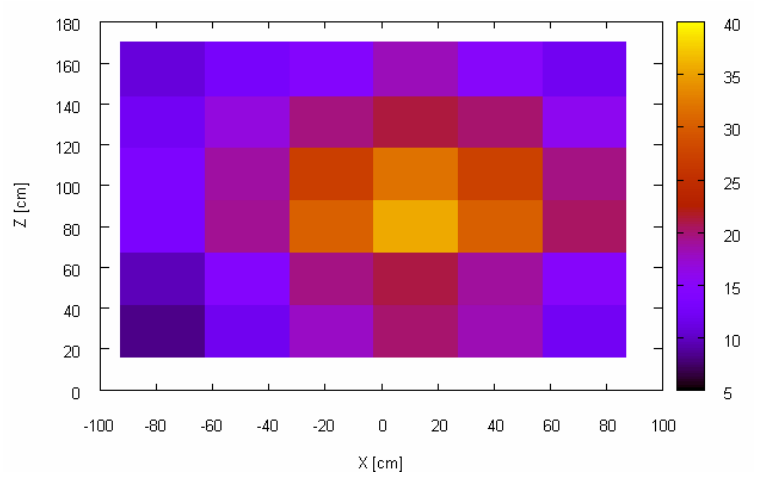

Figura B.8. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **total de fuites**. Pla paral·lel a la **Paret A**

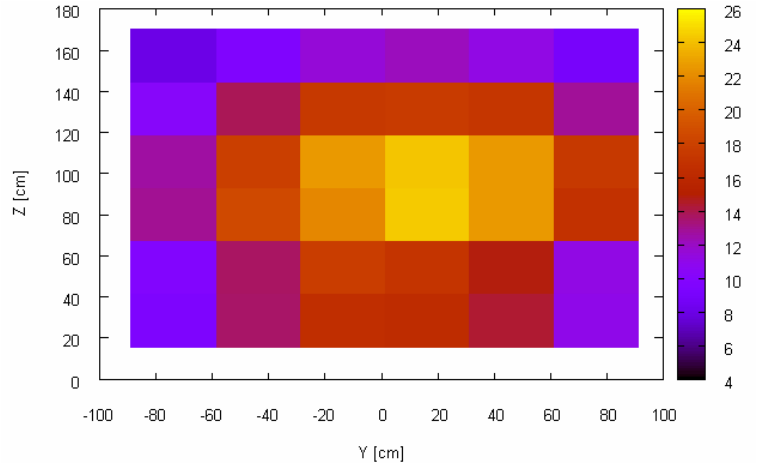

Figura B.9. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 2**. Pla paral·lel a la **Paret B**

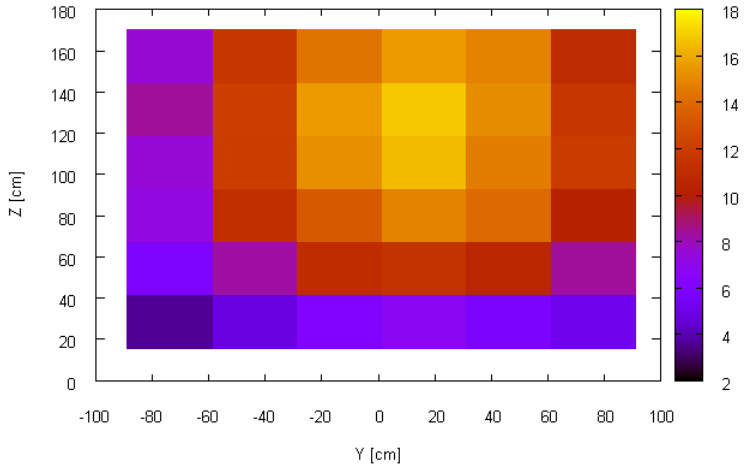

Figura B.10. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 3**. Pla paral·lel a la **Paret B**

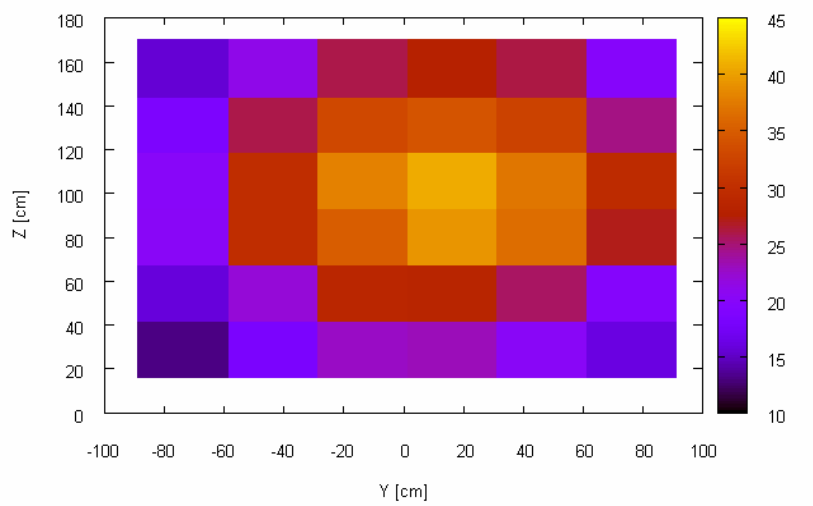

Figura B.11. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **total de fuites**. Pla paral·lel a la **Paret B**

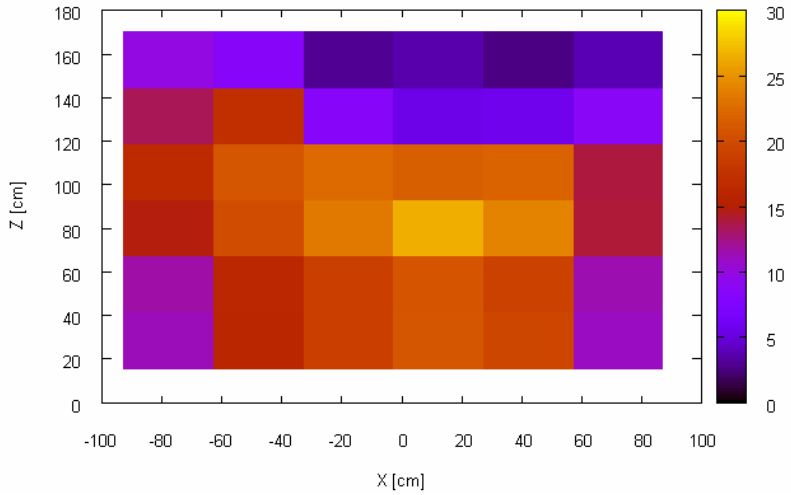

Figura B.12. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 2**. Pla paral·lel a la **Paret C**

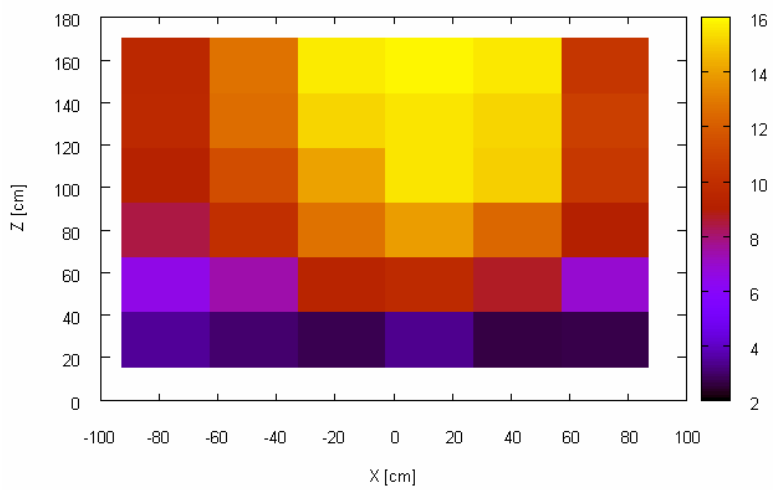

Figura B.13. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 3**. Pla paral·lel a la **Paret C**

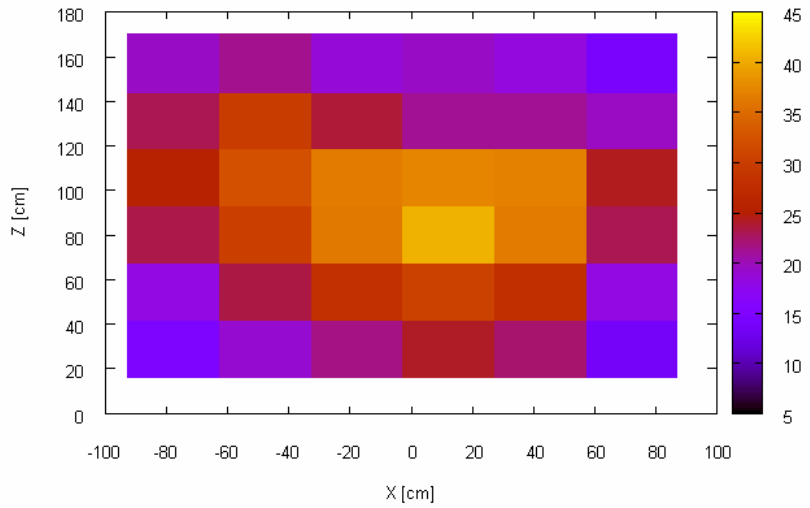

Figura B.14. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **total de fuites**. Pla paral·lel a la **Paret C**

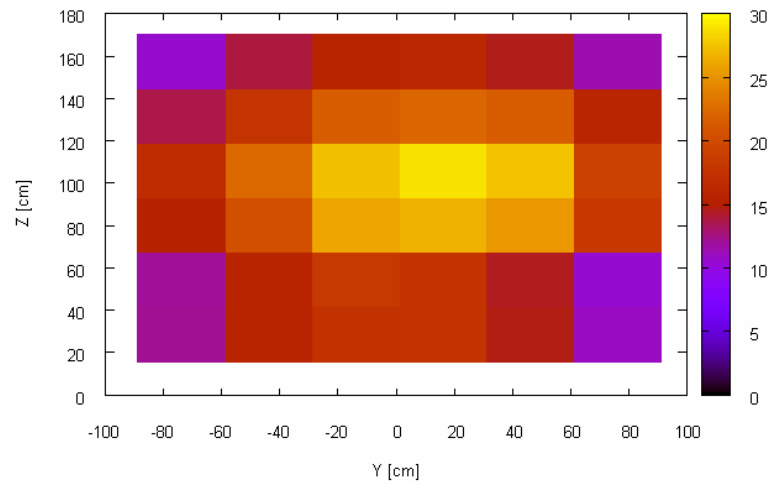

Figura B.15. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 2**. Pla paral·lel a la **Paret D**

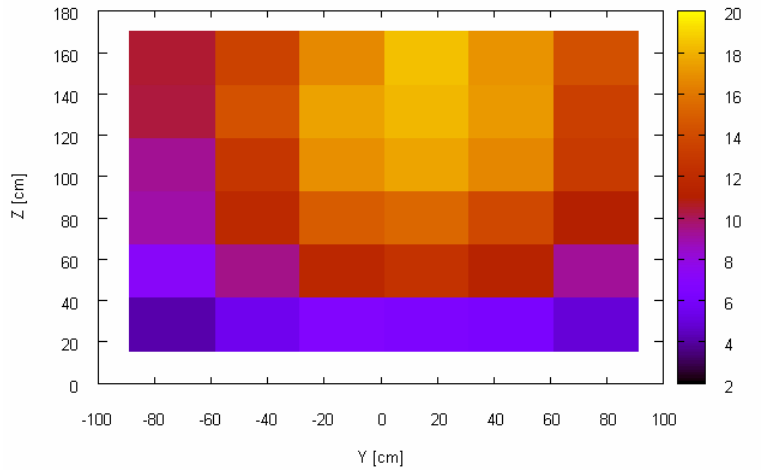

Figura B.16. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 3**. Pla paral·lel a la **Paret D**

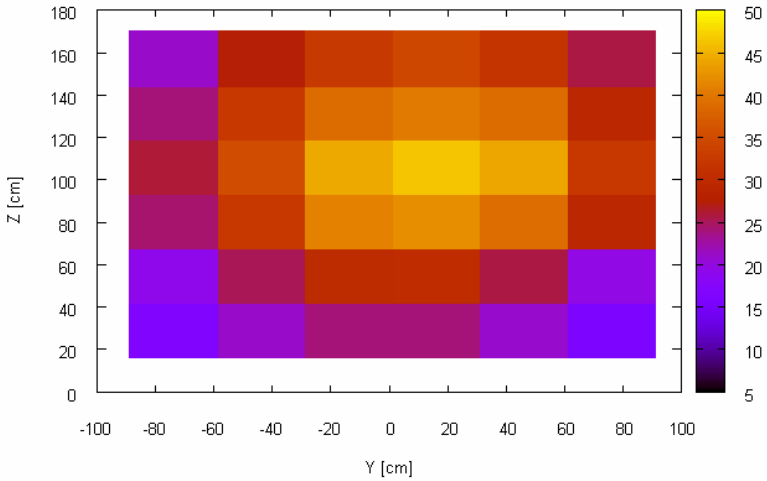

Figura B.17. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **total de fuites**. Pla paral·lel a la **Paret D**

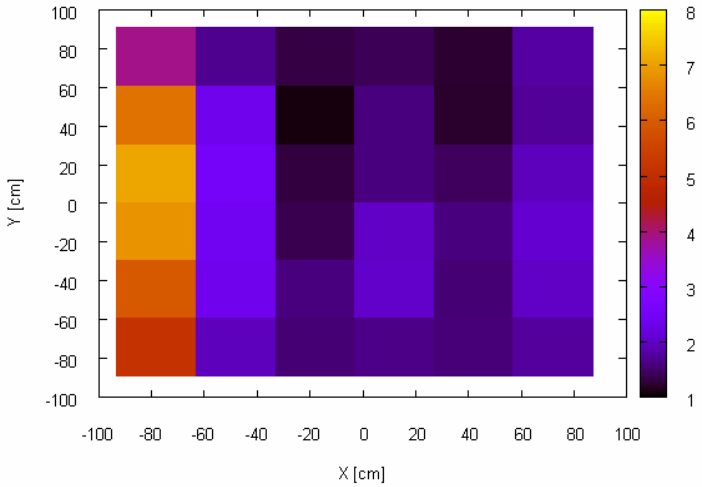

Figura B.18. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 2**. Pla paral·lel al **Sostre**

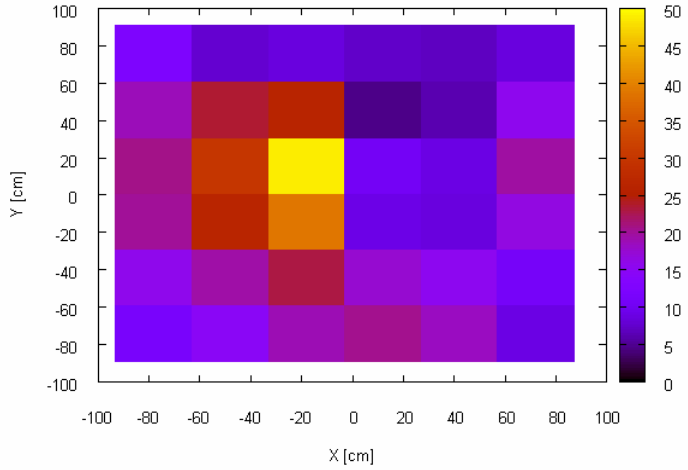

Figura B.19. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **blanc 3**. Pla paral·lel al **Sostre**

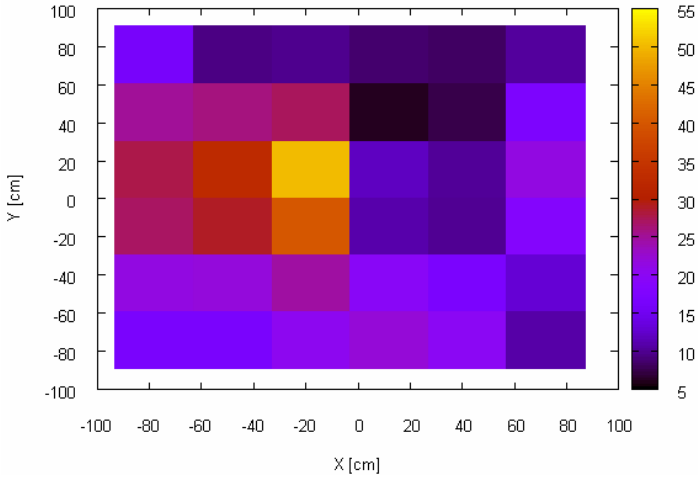

Figura B.20. Distribució de H*(10) [mSv/h] pel **total de fuites**. Pla paral·lel al **Sostre**

B.3 Distribucions obtingudes a les parets i sostre sense blindatge per la radiació de fuites.

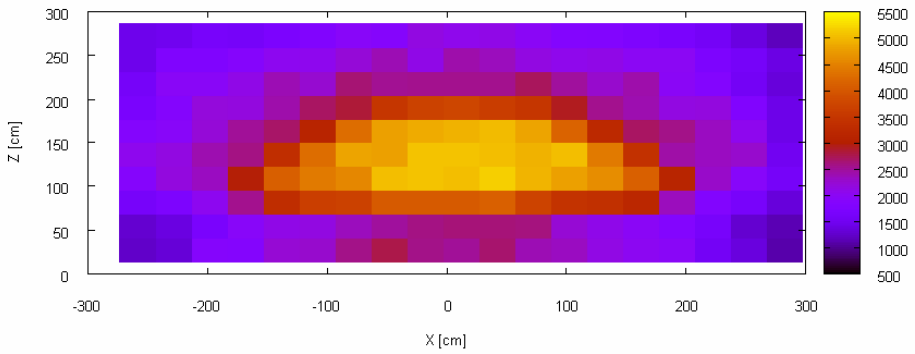

Figura B.21. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 2** a la **Paret A**

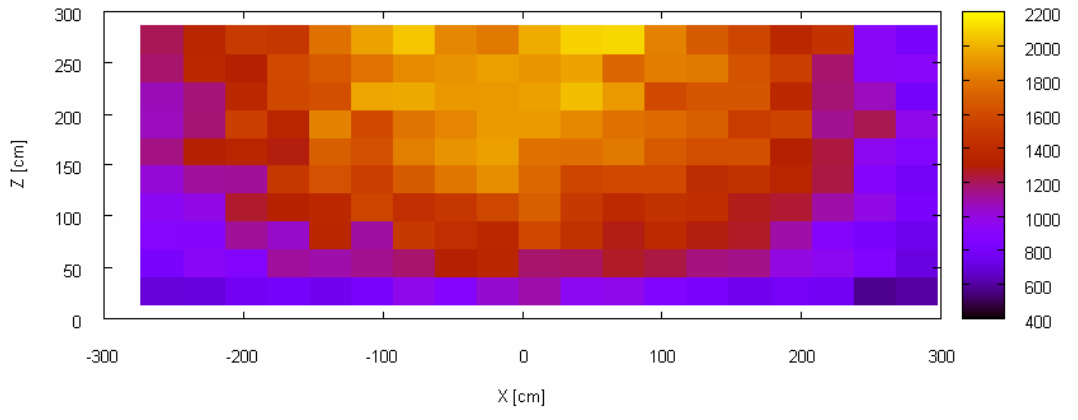

Figura B.22. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 3** a la **Paret A**

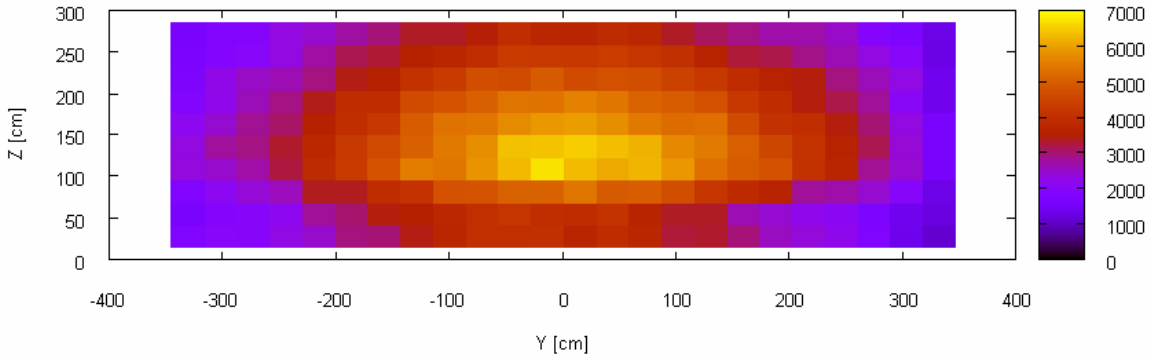

Figura B.23. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 2** a la **Paret B**

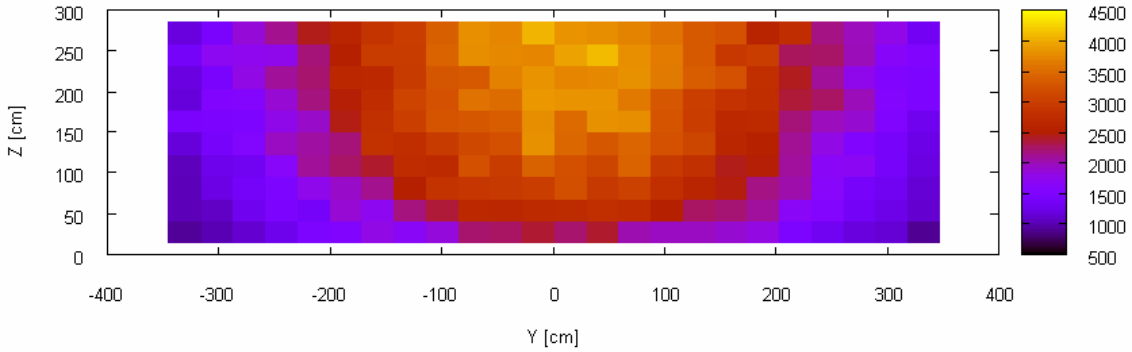

Figura B.24. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 3** a la **Paret B**

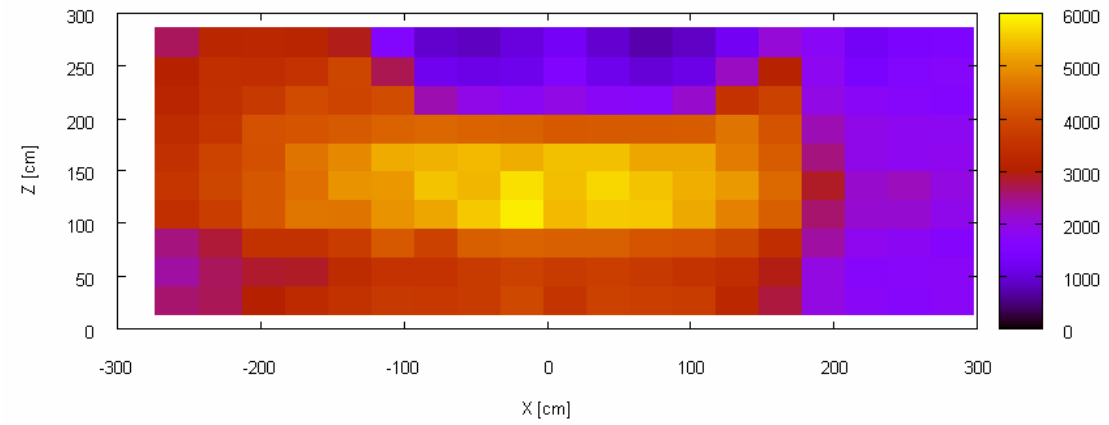

Figura B.25. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 2** a la **Paret C**

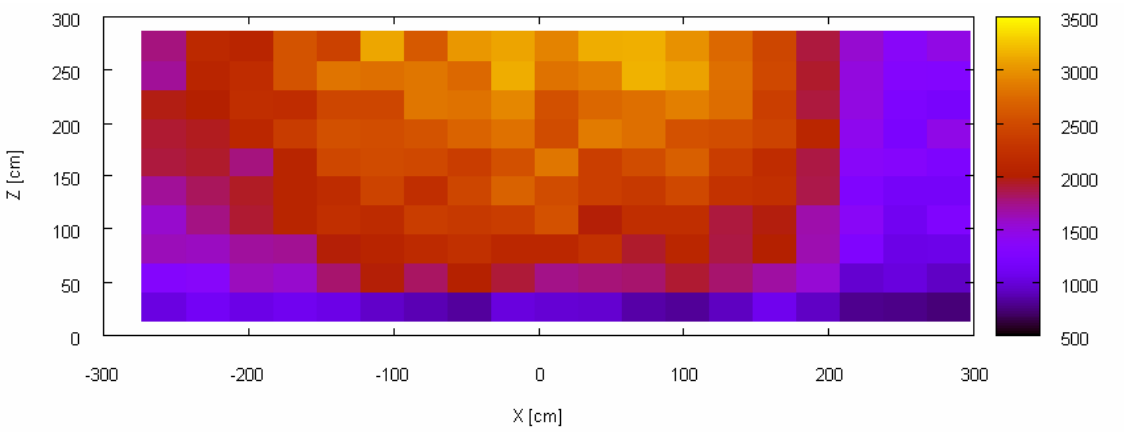

Figura B.26. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 3** a la **Paret C**

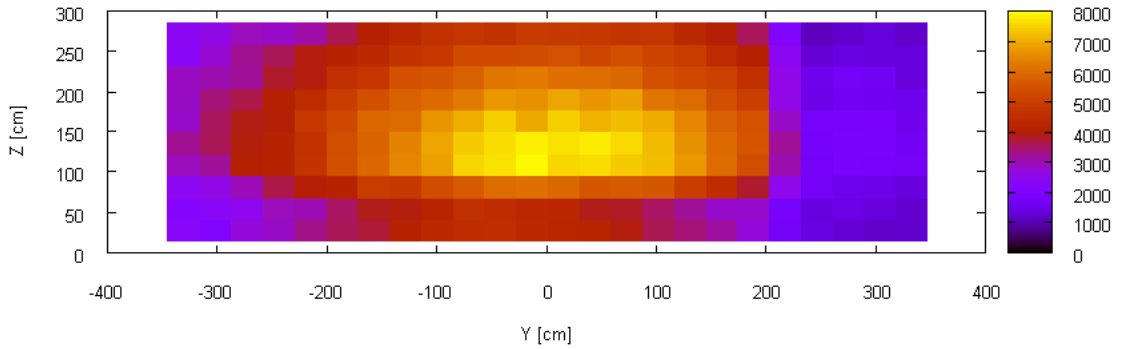

Figura B.27. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 2** a la **Paret D**

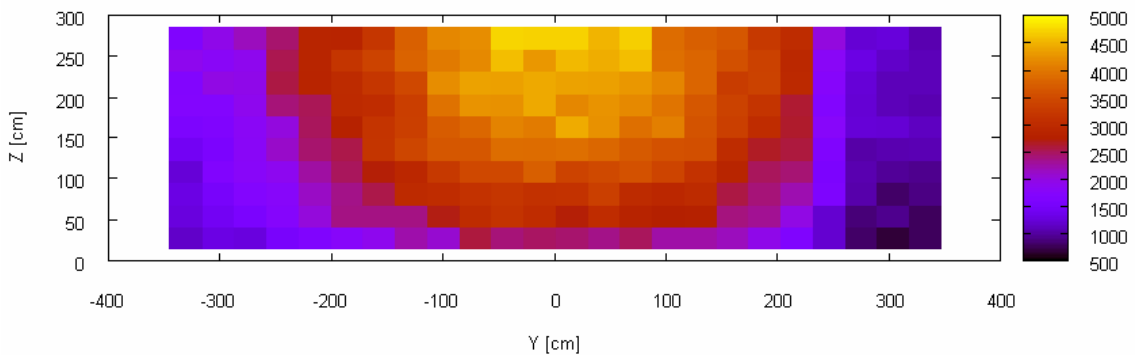

Figura B.28. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 3** a la **Paret D**

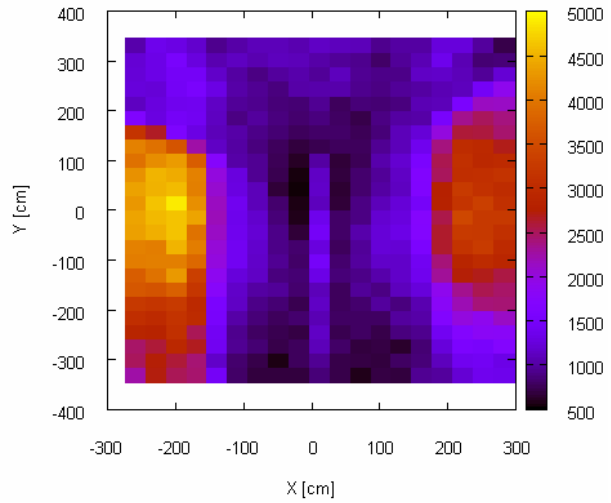

Figura B.29. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 2** al **Sostre**

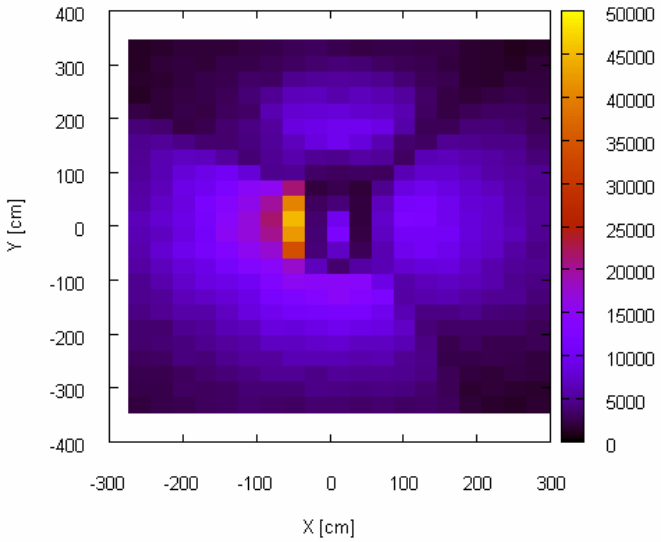

Figura B.30. Distribució de H*(10) [mSv/any] pel **blanc 3** al **Sostre**