

EVALUACION DEL BLINDAJE DE UNIDADES DE RAYOS X DENTALES

Eduardo Medrano, Héctor René Vega-Carrillo, Consuelo Letechipía de León
Víctor Martín Hernández-Dávila, Miguel Ángel Salas-Luévano

Universidad Autónoma de Zacatecas
Apdo. Postal 336
98000 Zacatecas, Zac. Mexico

edumeco@yahoo.com.mx, fermineutron@yahoo.com

Resumen

Se ha determinado la capacidad de los muros, de las salas de radiodiagnóstico dental, para abatir los niveles de dosis durante el uso de los equipos de rayos x. El estudio se realizó en la Unidad Académica de Odontología del campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Los equipos de rayos x son una herramienta de aprendizaje para los estudiantes de odontología, también se usan para brindar servicios de salud para la población; debido a esto es importante verificar que los niveles de dosis fuera de los muros de las salas son seguros. Durante el proceso de evaluación se usaron criterios conservadores sin menoscabo de los espesores necesarios en beneficio de la protección radiológica. De la evaluación se encontró que todos los muros satisfacen ampliamente su función como barreras contra los rayos x.

Palabras clave: Rayos x; Blindaje; Barrera; Odontología

1.- INTRODUCCIÓN

Los rayos x son usados en el campo de la medicina para el diagnóstico (radiodiagnóstico) y para el tratamiento. La radiografía es un instrumento de apoyo para el diagnóstico en las Ciencias de la Salud humana y animal. Esta técnica es no invasiva y permite obtener detalles de estructuras internas del cuerpo a partir de la diferencia en las densidades de los distintos tejidos y órganos [Vega-Carrillo *et al.*, 2008].

Los rayos x se producen a través de dos mecanismos de interacción entre los electrones y la materia, que dan lugar a rayos x continuos y rayos x discretos. El primer mecanismo de interacción es cuando un haz de electrones se acelera mediante una diferencia de voltaje y una vez alcanzada la máxima velocidad, los electrones se hacen chocar con un blanco, normalmente de Tungsteno, Rodio o Molibdeno. Cuando los electrones se transportan dentro del blanco experimentan fuerzas Coulombianas de interacción que hacen que los electrones se frenen y se desvíen de su trayectoria original perdiendo parte de su energía que se traduce en rayos x; a este tipo de rayos x se les llama Radiación de Frenado o *Bremsstrahlung*. Los rayos x de frenado tienen una distribución continua de energía que va desde los pocos eV hasta los keV para el caso de los equipos de diagnóstico, e incluso hasta los MeV para los equipos de radioterapia. El segundo mecanismo ocurre cuando los electrones interactúan con los electrones de las capas electrónicas de los átomos del blanco produciendo ionización y dejando una vacancia en la capa que es ocupada por otro electrón que al ocupar ese estado cede el exceso de energía en forma de fotones de rayos x; como los estados de energía en las capas de los átomos son discretos el fotón emitido tiene un valor único o discreto de energía; a estos rayos x se les llama rayos x discretos o característicos. Así, durante la interacción de los electrones con la materia se producen rayos x cuyo espectro tiene una parte continua y otra discreta [Vega-Carrillo *et al.*, 2008; Vega-Carrillo and Baltazar-Raigosa 2011]. En la figura 1 se muestra el espectro de los rayos x producido durante la interacción de un haz de electrones de 70 keV cuando interactúa con un blanco de Rh a 20 cm de distancia; aquí se observa la parte continua y discreta de los rayos x.

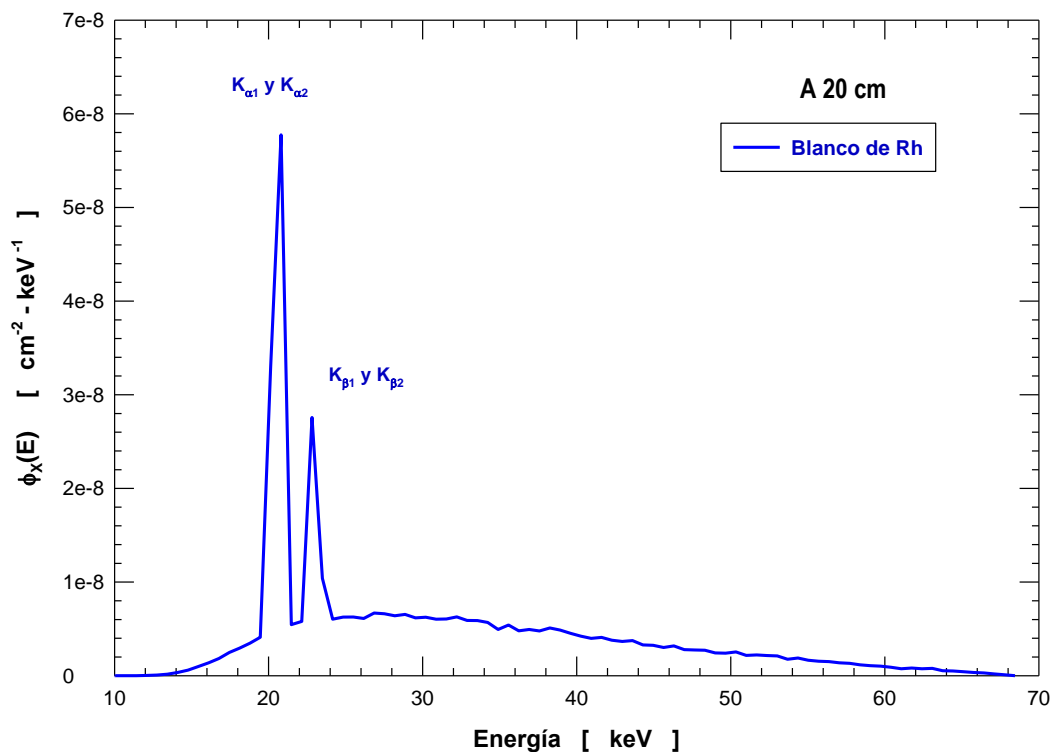


Figura 1.- Rayos x generados por electrones de 70 keV interactuando con un blanco de Rh.

Los rayos x son ondas electromagnéticas que interactúan con la materia mediante cuatro mecanismos: la dispersión Coherente, la dispersión Incoherente o dispersión Compton, el Efecto Fotoeléctrico y la producción de Pares (tanto electrónica como nuclear). La energía máxima de los rayos x para el diagnóstico es inferior a 1.022 MeV, por lo que la producción de pares no ocurre.

Los mecanismos de interacción de los rayos x con la materia provocan que el haz de rayos x se atenúe al atravesar un medio y este proceso se describe mediante la Ley de Atenuación mostrada en la ecuación 1.

$$I(x) = I_0 \text{Exp}[-\mu x] \quad (1)$$

En esta ecuación I_0 es la cantidad de rayos x que inciden sobre un material, $I(x)$ es la cantidad de rayos x que logran cruzar un material de espesor x y μ es el coeficiente de atenuación lineal del material. Este coeficiente es la suma de las probabilidades de que un

fotón interactúe con el medio mediante dispersión Coherente, dispersión Incoherente, Efecto Fotoeléctrico o Producción de pares. En la figura 2 se muestran los coeficientes de interacción y el coeficiente lineal total de plomo para fotones desde 1 keV hasta 10⁵ MeV.

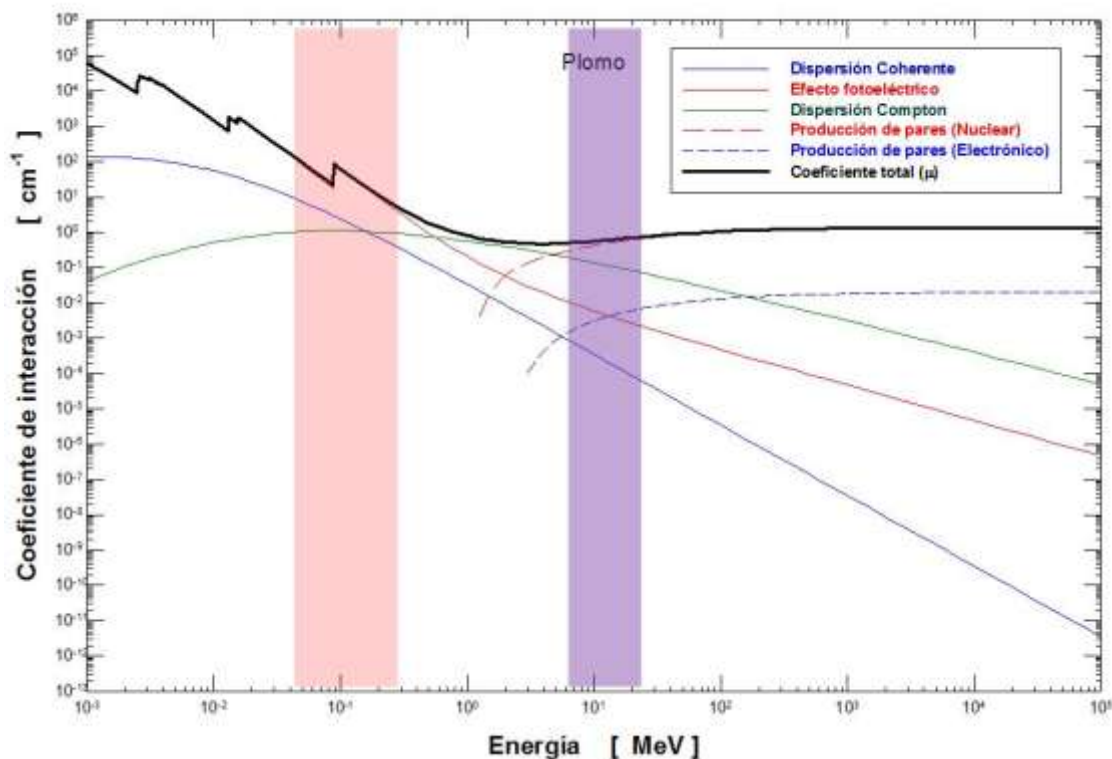


Figura 2.- Coeficientes lineales de interacción del plomo.

En la figura 2, la primera banda de la figura señala la zona de los rayos x usados para el diagnóstico y la segunda banda señala la zona de influencia de los rayos x usados en la radioterapia con aceleradores lineales. Una vez generados los rayos para el diagnóstico, el haz se hace incidir sobre la zona cuya radiografía se desea obtener y se coloca una película sensible a los rayos x tras la zona de interés, como se muestra en la figura 3.

Los rayos x son ondas electromagnéticas que al interactuar con la materia producen ionizaciones y excitaciones [NCRP 2003], si la interacción ocurre a nivel celular las ionizaciones y excitaciones se dan en el citoplasma, todas las estructuras dentro de éste y en el núcleo celular donde las ionizaciones y excitaciones provocan daño celular afectando la información genética o provocando la apoptosis [NCRP 2004].

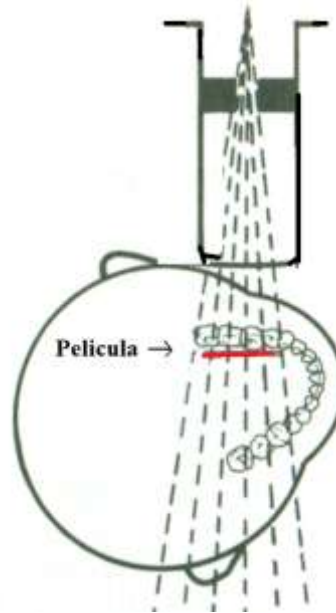


Figura 3.- Obtención de una radiografía dental.

Para reducir los riesgos por el manejo de la radiación es importante que el profesional de Ciencias de la Salud conozca las medidas básicas de la protección radiológica, también es importante que los equipos de radiodiagnóstico se instalen en recintos cuyos muros sean adecuados para evitar que los rayos x expongan a otras personas dentro de la instalación y al público [IAEA 2006; NOM 1996; NOM 2006].

El objetivo de este trabajo es evaluar los muros de las salas de radiodiagnóstico dental de la Unidad Académica de Odontología en el campus Siglo XXI con el fin de determinar si satisfacen los requisitos para blindar los rayos x.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de las barreras se realizó en las salas de radiodiagnóstico dental del campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas donde la Unidad Académica de Odontología tiene 3 equipos de rayos x ubicados en la sección de laboratorios del campus; en la figura 4 se muestra un esquema de la vista superior del área donde se encuentran los

equipos, cada recinto ha sido identificado como Sala A, B y C. Los muros son de ladrillo pegados con mortero (mezcla) y acabados de concreto, los muros tienen un espesor mínimo de 16 cm. Entre la sala C y la zona identificada como archivo una sección del muro es de tablaroca.

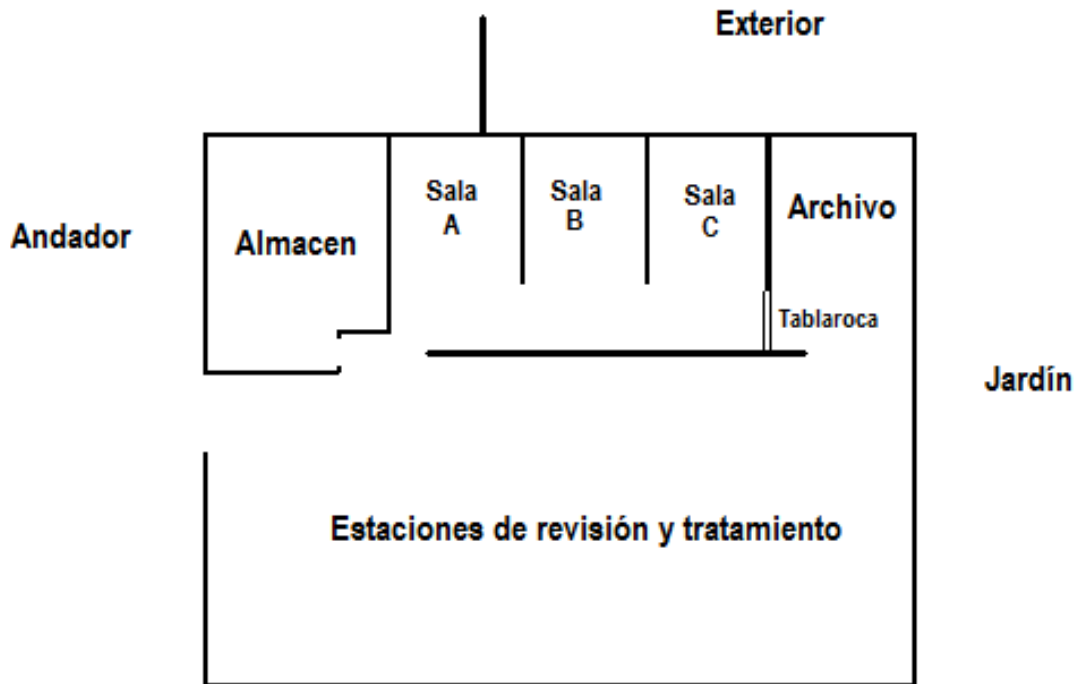


Figura 4.- Esquema general de las unidades de rayos X en el campus Siglo XXI.

Las salas A, B y C no tienen muro frontal ni techo contiguo y la altura de los muros de las salas tienen una altura de 2 metros y sus dimensiones son de aproximadamente 2.1 m de ancho por 2.2 m de largo.

Frente a las salas hay un pasillo separado por un muro de la zona donde se ubican varias estaciones dentales para revisión y tratamiento de los pacientes donde hay estudiantes y profesores.

El acceso a todos los espacios no está restringido, ni existen barreras que controlen el acceso; en la figura 5 se muestra una vista panorámica del recinto.

Estaciones de revisión y tratamiento

Rayos x



Figura 5.- Unidades de revisión y tratamiento y espacio de radiología.

En la figura 6 se muestran las 3 salas con los equipos de radiodiagnóstico.



Sala A



Sala B



Sala C

Figura 6.- Salas de radiodiagnóstico.

Los equipos de rayos X son CORIX MEDICAL SYSTEMS, modelo CORIX 70 PLUS-USV-WM-DIGITAL y sus condiciones de operación son 70 kV y 8 mA. Los tubos tienen un cono de apertura abierta que permite dirigir el haz; el tubo de rayos x se coloca moviendo los brazos que lo sujetan. Debido a que estas unidades de rayos x cumplen dos cometidos, primero es como dispositivos de aprendizaje para los estudiantes y para brindar un servicio al público, es indispensable que los espesores y los materiales usados en la

construcción de los muros sean adecuados para garantizar que la dosis efectiva tras las barreras no exceda los límites semanales para personal no ocupacionalmente expuesto [ICRP 2007]. Este límite, según la norma mexicana, no debe ser mayor a 0.1 mSv/semana [NOM 2006], sin embargo con el fin de establecer límites más estrictos en beneficio de los estudiantes, profesores y público en este análisis lo hemos fijado en 0.02 mSv/semana, que es congruente con la normatividad internacional [NCRP 2003; NCRP 2004].

Con el fin de evaluar las barreras se visitó la instalación y se observó la forma en que se usan los equipos con el fin de identificar las barreras primarias y secundarias. También, la observación se realizó para determinar los factores de uso, U, de las barreras y los factores de ocupación, T, de las áreas tras las barreras. En cada sala se tomaron los datos de los equipos y se midieron las dimensiones de las barreras, con esta información se elaboró la memoria de cálculo de cada sala. Para realizar la evaluación se calcularon los espesores necesarios de los muros requeridos para asegurar que tras las barreras el límite de dosis semanal no sea superado. Para este cálculo se usó el método de Archer [1983, 1994], complementado con las recomendaciones de Simpkin [1988; 1995] que es el método recomendado en el NCRP 147 [2004].

Se define como barrera primaria aquella que soporta el haz de rayos x y barrera secundaria es aquella que recibe el haz de rayos x que se dispersa en la superficie del cuerpo de paciente y el flujo de rayos x que se escapa del cabezal que contiene al tubo de rayos x [NCRP 2004].

En el caso de las salas de radiodiagnóstico dental del campus Siglo XXI, las variantes en la definición de las barreras son tres:

- Cuando el haz se dirige de izquierda a derecha del paciente
- Cuando el haz se dirige de derecha a izquierda del paciente
- Cuando el haz se dirige de frente al rostro del paciente

En tales circunstancias 3 muros fungirán como barreras primarias y el resto serán barreras secundarias. Debido a que el haz jamás se dirige hacia el piso y las unidades de rayos x se encuentran en la planta baja, el piso no es considerado. En la planta alta hay instalaciones pero por la altura del techo y debido a que el haz jamás se dirige hacia éste, el techo tampoco es considerado. En la figura 7 se muestra un esquema de la definición de las barreras cuando el haz se dirige de izquierda a derecha del paciente. De acuerdo con la información proporcionada por los usuarios el factor de uso de la barrera en esta posición es del 0.37. En la figura 8 se muestra un esquema de la definición de las barreras cuando el haz se dirige de derecha a izquierda del paciente; de acuerdo con la información proporcionada por los usuarios el factor de uso de haz en esta posición es del 0.37; y en la figura 9 se muestra el esquema usado en la definición de las barreras cuando el haz se dirige de frente al rostro del paciente, donde el factor de uso de esta barrera es de 0.3.

Cada barrera se identifica con un número romano y los valores de las distancias se toman del centro del cabezal hacia un punto fuera de las barreras para determinar la dosis debida a la radiación que se fuga del cabezal (d_L).

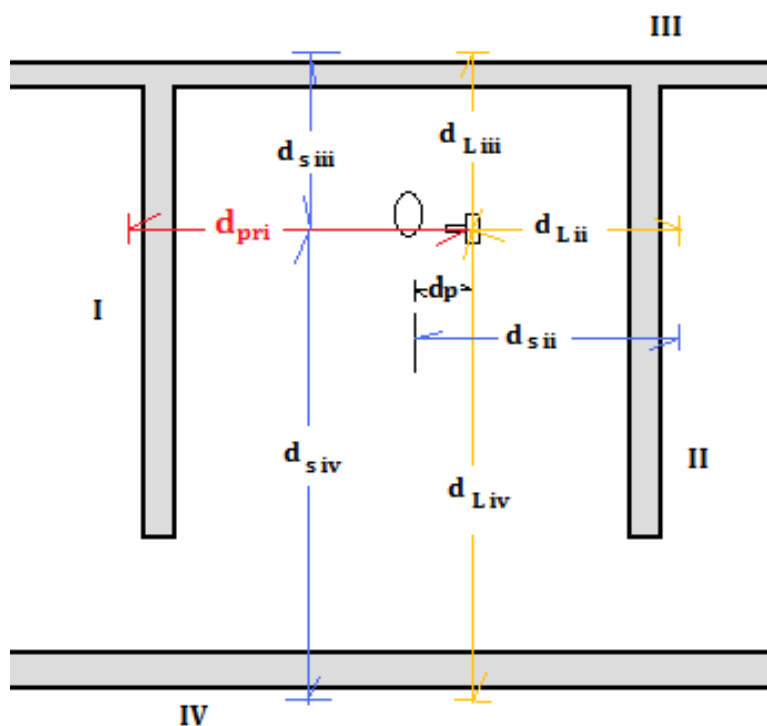


Figura 7.- Definición de las barreras cuando el haz se dirige de izquierda a derecha del paciente.

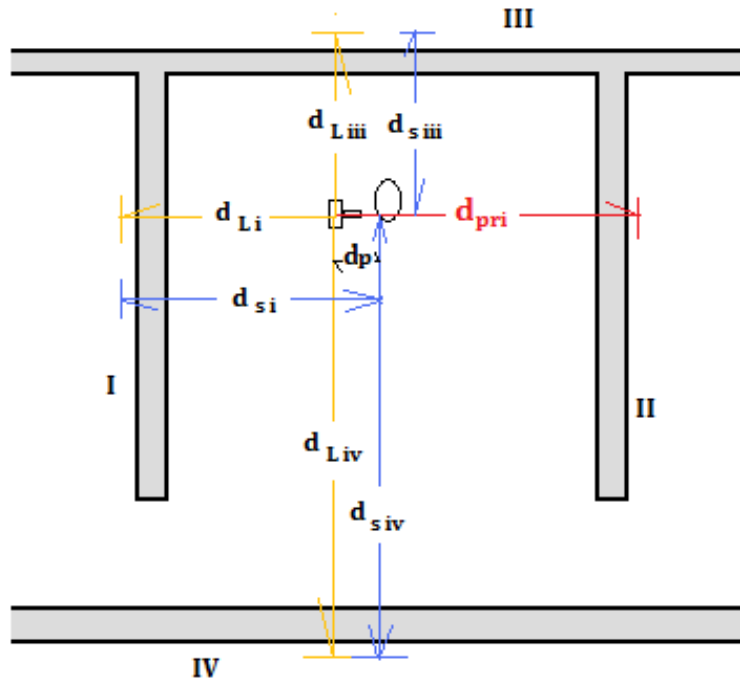


Figura 8.- Definición de las barreras cuando el haz se dirige de derecha a izquierda del paciente.

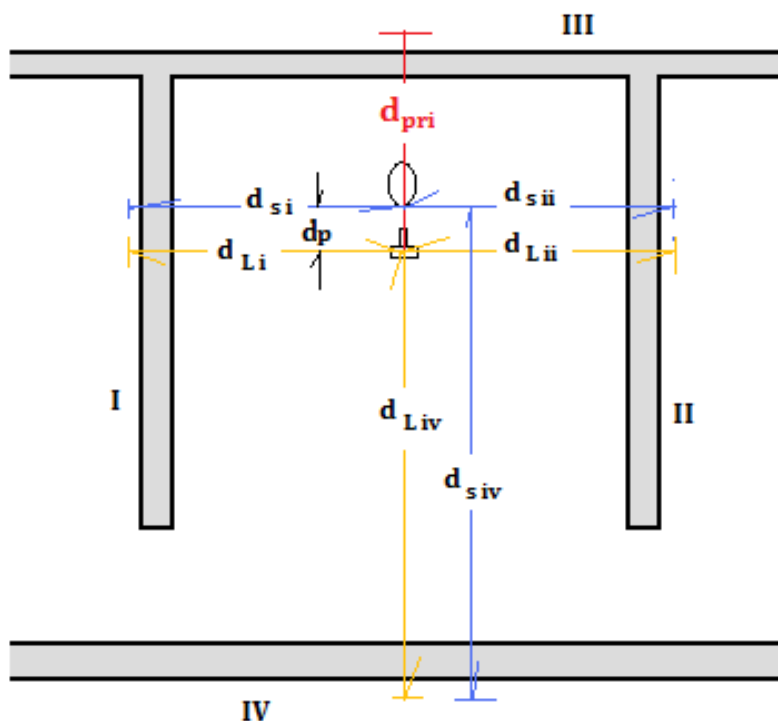


Figura 9.- Definición de las barreras cuando el haz se dirige de frente al paciente.

Para tomar en cuenta la radiación que es dispersada por el rostro del paciente la distancia se mide a partir de la superficie de entrada del haz sobre el rostro del paciente (d_s). Con el fin de usar un criterio conservador en los cálculos de las barreras, la distancia entre el blanco del tubo de rayos x y el punto de impacto del haz sobre la piel del paciente (d_p) se asumió de 25 cm, en lugar de 30 cm.

El criterio del cálculo del espesor de las barreras primarias se realizó calculando la dosis que produce el haz en el punto tras la barrera primaria suponiendo que la barrera no existe, para este cálculo se consideró la carga de trabajo, W , del tubo, el factor de uso de la barrera en cuestión, U , y el factor de ocupación de la zona tras barrera, T . El valor determinado se usó, junto con el valor de dosis deseado, P , una vez que la barrera esté en posición y se obtuvo el factor de transmisión relativo de la barrera. Se usaron los parámetros recomendados en el NCRP para el concreto y el espesor resultante se convirtió al espesor equivalente del ladrillo rojo; así el espesor requerido de la barrera primaria, x_{pri} , para abatir el nivel de dosis que produce el tubo en el punto d_p se calculó mediante la ecuación 2.

$$x_{\text{pri}} = \frac{0.1 \rho_c}{\alpha \gamma \rho_{\text{ladrillo}}} \ln \left\{ \frac{\left(\frac{P d_{\text{pri}}^2}{\Gamma W U T} \right)^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right\} \quad (2)$$

En esta ecuación x_{pri} es el espesor de la barrera primaria de ladrillo rojo en centímetros, ρ_c es la densidad del concreto que se definió como 2.35 g/cm^3 , ρ_{ladrillo} es la densidad del ladrillo rojo, que con fines conservadores se definió como 1.4 g/cm^3 , que es el valor más pequeño recomendado, P es la rapidez de dosis semanal deseada tras la barrera primaria (0.02 mSv/semana), Γ es el rendimiento del tubo que usando un criterio conservador se definió como $9.5 \text{ mSv-m}^2\text{-mA}^{-1}\text{-min}^{-1}$, en lugar de $3.2 \text{ mSv-m}^2\text{-mA}^{-1}\text{-min}^{-1}$, recomendado para un tubo de 70 kVp y con un filtro equivalente de 2.3 mm de aluminio, W es el factor de carga del tubo que se definió conservadoramente como 23 mA-min/semana en lugar de 3 mA-min/semana recomendado para gabinetes radiológicos dentales con equipos de 70 kVp ; este criterio conservador se justifica por el hecho de que la cantidad de placas radiográficas que se toman, debido a que las características educativas y de servicio que se ofrecen, superan a las de un gabinete comercial, α , β y γ son los parámetros de ajuste de las curvas de atenuación del concreto para rayos x primarios de 70 keV de energía máxima, determinados en geometría ancha.

Para definir el espesor de la barrera secundaria, x_{sec} , se determinó primero el espesor necesario para abatir los niveles de dosis debido a la radiación dispersada por el cuerpo del paciente y posteriormente se determinó el espesor necesario para abatir el nivel de dosis debido a la radiación que se fuga del cabezal. Del valor absoluto de la diferencia entre estos dos espesores se aplicó el criterio siguiente: Si el valor absoluto de la diferencia es menor a una capa decireductora, $x_{1/10}$ el espesor definitivo de la barrera secundaria es el espesor que resulte mayor entre la x_s y x_L . Si la diferencia es mayor o igual a $1 x_{1/10}$ se selecciona el valor del espesor mayor y a éste se le agrega otra capa decireductora. El espesor de la barrera para abatir la dosis debida a la radiación dispersada por el rostro del paciente se obtuvo mediante la siguiente expresión.

$$x_{sca} = \frac{0.1 \rho_c}{\alpha \gamma \rho_{ladrillo}} \ln \left\{ \frac{\left(4 \frac{P d_p^2 d_{pri}^2}{\Gamma W T \theta_s} \right)^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right\} \quad (3)$$

En esta ecuación el factor de uso de las barreras secundarias se normalizó a 1 debido a que siempre que se dispara el haz las barreras secundarias reciben el haz dispersado, el área de iluminación del haz se supuso de 10 x 10 cm², θ_s es un parámetro que toma en cuenta el ángulo de dispersión y que con fines conservadores se adoptó el valor más rígido (0.002), los parámetros α , β y γ son los correspondientes a las curvas de atenuación del concreto para haces de rayos x secundarios emitidos por tubos de 70 kVp.

Para el cálculo del espesor necesario de las barreras secundarias para abatir los niveles de dosis tras las barreras a 0.02 mSv/semana debido a la radiación que se fuga del cabezal se asumió un valor de Q de 100 mA-min/h para equipos de 70 kVp que todos los fabricantes de cabezales de equipos de rayos x deben cumplir, bajo estas condiciones el haz directo produce 1 mGy/h. Al igual que en el caso de la radiación dispersada el factor de uso de estas barreras ante la radiación de fuga es 1. Para determinar el espesor se procedió primero a determinar el factor de transmisión, B_L , mediante la ecuación (4).

$$B_L = \frac{P Q d_L^2}{W T} \quad (4)$$

Con este valor se estimó el número de barreras hemireductoras de concreto necesarias que al multiplicarse por el valor del espesor hemireductor del concreto, $x_{1/2} = 1.3$ cm, nos arroja el espesor en centímetros necesarios que se convirtieron en el espesor en centímetros de ladrillo rojo; así, el espesor de ladrillo rojo requerido para abatir los niveles de dosis debido a la radiación de fuga se obtuvo mediante la ecuación (5). El espesor definitivo de las barreras secundarias se obtuvo de comparar el valor del espesor obtenido mediante la ecuación 3 y la ecuación 5.

$$x_L = 1.4427 \left(\frac{x_{\frac{1}{2}} \rho_c}{\rho_{\text{ladrillo}}} \right) \ln \left(\frac{1}{B_L} \right) \quad (5)$$

3.- RESULTADOS

Del análisis de los resultados se encontró que el espesor máximo necesario de las barreras primarias es de 13 cm de ladrillo y el espesor máximo necesario de las barreras secundarias es de 9 cm de ladrillo. Los muros están contruidos con ladrillo y un recubrimiento cuyo espesor es de 15 cm, por lo tanto este espesor cubre ampliamente sus funciones como barreras y el personal que está del otro lado de las barreras está protegido.

4.- CONCLUSIONES

Se han evaluado los muros de las Salas A, B y C de la unidad de rayos x de la Unidad Académica de Odontología del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. A partir de las dimensiones de las salas, los espesores de los muros, las características técnicas y de uso de los equipos de rayos x se encontró que los espesores satisfacen ampliamente sus características de blindaje, por lo que el personal que se encuentra tras las barreras no se expone a los campos de radiación que se generan cuando los equipos se usan con fines didácticos o de servicio al público.

4.1.- Recomendaciones

A partir de las observaciones realizadas y en el ánimo de satisfacer la normatividad vigente en México se hacen las siguientes recomendaciones:

- Usar señalizaciones acorde a lo señalada en la normatividad mexicana.
- Colocar carteles visibles que adviertan a estudiantes, profesores, personal de apoyo y público comunicar al odontólogo si se sospecha o existe certeza de embarazo antes de que se le haga una placa radiográfica.

REFERENCIAS

- Archer BR; Thomby JI; Bushong SC. (1983). *Diagnostic x-ray shielding design based on an empirical model of photon attenuation*. Health Physics **44**: 507-517.
- Archer BR; Fewell TR; Conway BJ; Quinn PW. (1994). *Attenuation properties of diagnostic x-ray shielding materials*. Medical Physics **21**: 1499-1507.
- IAEA. (2006). *RADIATION PROTECTION IN THE DESIGN OF RADIOTHERAPY FACILITIES*. International Atomic Energy Agency STI/PUB/1223. Vienna.
- ICRP. (2007). *Recomendations of the International Commission of Radiological Protection*. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP **37**: 61-78.
- NCRP. (2003). *RADIATION PROTECTION IN DENTISTRY*. National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 145. Bethesda, MD.
- NCRP. (2004). *STRUCTURAL SHIELDING DESIGN FOR MEDICAL X-RAY IMAGING FACILITIES*. National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 147. Bethesda, MD.
- NOM. (1996). *Salud Ambiental. Requisitos técnicos para las instalaciones en establecimientos de diagnóstico médico con rayos x*. Norma Oficial Mexicana NOM-156-SSA1-1996. México.
- NOM. (2006). *Salud Ambiental: Requisitos técnicos para las instalaciones, responsabilidades sanitarias, especificaciones técnicas para los equipos y protección radiológica en establecimientos de diagnóstico médico con rayos x*. Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002. México.
- Simpkin DJ. (1988). *Fitting parameters for medical diagnostic x-ray transmission data*. Health Physics **54**: 345-347.
- Simpkin DJ. (1995). *Transmission data for shielding diagnostic x-ray facilities*. Health Physics **68**: 704-709.

Vega-Carrillo HR; Ramírez González J; Manzanares E; Hernández-Dávila VM; Hernández-Villasana R. (2008). *Mamography x-ray spectra simulated with Monte Carlo*. Proceedings of the American Institute of Physics **1032**: 208-211.

Vega-Carrillo HR; Baltazar-Raigosa A. (2011). *Photoneutron spectra around an 18 MV linac*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **287**: 323-327.