



# Universidade de São Paulo

## Faculdade de Odontologia

Departamento de Estomatologia  
Disciplina de Radiologia  
Prof. Dr. Luciano Augusto Cano Martins

## PRODUÇÃO DOS RAIOS X

### 1. NATUREZA DA RADIAÇÃO

Radiação corresponde à transmissão de energia pelo espaço e matéria. Essencialmente, podemos classificar dois tipos diferentes de radiação: corpuscular e eletromagnética.

#### *1.1. Radiação corpuscular*

Como o próprio nome indica, são a propagação de energia sob a forma de corpúsculos ou partículas, ou seja, que possuem massa. Átomos grandes tendem a ter um número diferente de prótons e nêutrons em sua composição o que causa instabilidade. Esse fato faz com que estes elementos busquem uma distribuição igual entre essas partículas fundamentais através da quebra/decaimento de sua estrutura, ocorrendo então a liberação de partículas alfa ou beta (e/ou raios gama). Essa característica de decaimento de alguns átomos é chamada de radioatividade, e a liberação de partículas dessa maneira corresponde à radiação corpuscular. A capacidade da radiação corpuscular em ionizar átomos depende de sua massa, velocidade e carga. Uma partícula perde energia cinética toda vez que ioniza a matéria adjacente. A taxa de perda de energia de uma partícula à medida que ela se move pela matéria (tecido) é chamada de transferência linear de energia (LET). Quanto maior o tamanho físico da partícula, mais elevada é a carga, e quanto menor a sua velocidade, maior a sua LET. Radiações de alta LET concentram sua ionização em um curto caminho, enquanto as radiações de baixa LET produzem pares de íons muito mais esparsamente ao longo de um caminho mais longo (penetram mais nos corpos).

#### *1.2. Radiação eletromagnética*

Quando uma partícula eletricamente carregada tem sua velocidade alterada (diminuída), ela emite energia decorrente dessa frenagem. A energia liberada é acompanhada por um campo elétrico e um campo magnético, o que caracteriza então a radiação eletromagnética, que é o movimento da energia através do espaço, não possuindo massa. O comportamento desse tipo de radiação é explicado pela associação de duas teorias. Na teoria quântica, descreve-se que a radiação eletromagnética é representada por pequenos pacotes de energia, chamados de fótons, e que cada um desses fótons viaja na velocidade da luz, carregando uma quantidade específica de energia, determinada pela unidade elétron-volt (eV). Já a teoria ondulatória assume que o comportamento de propagação da radiação eletromagnética se dá em forma de ondas, acompanhada por campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e que oscilam no sentido da direção de propagação. Além disso, de acordo com a teoria ondulatória, as radiações eletromagnéticas apresentam duas propriedades essenciais para determinação de suas características, que são: comprimento de onda e frequência, sendo inversamente proporcionais entre si. Dessa maneira, existe um espectro de radiações eletromagnéticas que são classificadas de acordo com essas características. Dentre elas, podemos citar em ordem decrescente de comprimento de onda: ondas de rádio, micro-ondas, luz visível, luz ultravioleta, raios X e raios gama.

## **2. RAIOS X**

### *2.1. Descoberta dos raios X*

Os raios X foram descobertos em 1895 por Wilhelm K. Roentgen, enquanto fazia um experimento acerca da fluorescência dos raios catódicos em um tubo de Crookes-Hittorf (feixe de elétrons). Com o tubo coberto, ele percebeu que um material composto de bário, distante do tubo, estava emitindo fluorescência. Devido a distância entre esses materiais, Roentgen deduziu que esse efeito não era dos raios catódicos, mas sim de uma nova forma de energia (ou radiação), que foi denominada por ele como raios X, fazendo uma alusão à incógnita matemática.

### *2.2. Propriedades dos raios X*

Como descrito por Roentgen, os raios X são originados a partir de aceleração e frenagem de elétrons (alteração da velocidade) e, portanto, são parte das radiações eletromagnéticas. Por ser uma forma de radiação eletromagnética, os raios X possuem algumas características descritas que são similares à luz visível e algumas propriedades que os diferem da luz visível. Se assemelham a luz visível por não possuírem massa, se propagarem na velocidade da luz, apresentando uma trajetória linear e divergente. Contudo, se diferem da luz visível por serem invisíveis, não sofrerem refração ou reflexão, terem a capacidade de penetrar em corpos opacos e são capazes de causar ionização.

Ionização é a capacidade de produzir íons, ou seja, a capacidade de remover elétrons de um átomo, tornando-o eletricamente positivo e instável. A energia da onda eletromagnética (radiação X), ao superar a força de ligação de um elétron ao núcleo de um átomo, o remove, gerando um par de íons: átomo íon positivo, pois teve um elétron arrancado de sua órbita, e um elétron íon negativo, que está livre no meio representado por uma carga negativa. Ambos os íons (átomo positivo e elétron livre negativo) reagem com outros íons do meio até se tornarem neutros, ou equilibrados. O poder de ionização de um fóton de raios X será influenciado pelo comprimento de onda. Quanto menor o comprimento de onda, maior sua energia e, portanto, maior o poder de ionização do fóton de raios X.

### **3. APARELHO DE RAIOS X**

A definição básica para os aparelhos de raios X é: uma máquina que produz um feixe de radiação X com principal objetivo de direcionar o feixe para uma região de interesse, usualmente no paciente, fazendo com que os raios X atravessem os tecidos do paciente e atinjam um receptor de imagem, com finalidade de formação de uma imagem radiográfica. Os aparelhos de raios X são comumente encontrados em ambientes médicos, mas principalmente no dia a dia do cirurgião dentista.

#### *3.1. Tipos de aparelhos*

Na odontologia podemos destacar dois principais tipos dos aparelhos radiográficos: intrabucais ou extrabucais. A diferença entre eles se dá principalmente na

posição do receptor de imagem em relação ao paciente, sendo que para os intrabuciais o receptor é colocado internamente a cavidade bucal e para os extrabuciais o receptor se encontra fora da cavidade bucal. Os aparelhos presentes comumente nos consultórios odontológicos são os intrabuciais, que podem ser fixos na parede, móveis, possuindo suporte com rodas para seu deslocamento ou portáteis, que possuem menores dimensões e podem ser carregados. Os aparelhos extrabuciais são mais comuns em clínicas de radiologia, são aparelhos de maior dimensão e fixos na parede e solo.

### *3.2. Componentes*

Os componentes básicos dos aparelhos intrabuciais são o painel de controle, braço articulado, base e o cabeçote. O painel de controle permite ao operador ajustar parâmetros de exposição, sendo principalmente este o tempo de exposição, mas em alguns aparelhos outros parâmetros como o potencial e a corrente do tubo também poderão ser ajustados. O braço articulado corresponde à uma extensão da base ligada ao cabeçote e é uma estrutura que possibilita e facilita o manejo e posicionamento do cabeçote de acordo com a região de interesse. O braço articulado é extremamente importante na composição do aparelho de raios X pois o cabeçote é um componente extremamente pesado devido a toda sua composição interna, descrita a seguir.

### *3.3. Cabeçote*

Dentro do cabeçote existem diversos componentes com razões específicas, dentre eles blindagem metálica e o selamento do cabeçote (para evitar o vazamento de radiação X para outras região que não a de interesse), óleo isolante (com intuito de dissipar o calor formado durante a formação dos raios X), transformadores de alta e baixa voltagem (componentes elétricos responsáveis pela formação de raios X), filtros de alumínio (melhoramento da qualidade energética do feixe de radiação eliminando fótons de baixa energia), diafragma e colimador (responsáveis pela restrição da abrangência e forma do feixe de radiação), dispositivo ou cilindro localizador (guia de orientação para o posicionamento e direção do feixe de radiação) e tubo ou ampola de raios X (responsável pela formação de fato dos raios X).

### *3.4. Tubo de raios X*

O tubo de raios X é uma ampola de vidro plumbífero hermeticamente selado e sem ar em seu interior (vácuo). Importante, o vidro plumbífero impede a propagação do feixe de radiação para seu exterior em todas as direções que são formados, desta forma apresenta uma janela (região do vidro sem blindagem plumbífera) que permite a saída do feixe de radiação em apenas uma direção. Dentro da ampola, estão presentes dois componentes: o cátodo e o ânodo.

#### 3.4.1. *Cátodo*

O cátodo também pode ser referido como o gerador de elétrons, e conhecido como polo negativo. Ele é composto por uma taça focalizadora de molibdênio, e apresenta na região central da sua superfície um filamento em espiral composto por tungstênio. É através do aquecimento desse filamento que serão gerados os elétrons responsáveis pela formação de raios X. Por isso, a taça focalizadora apresenta-se como uma concavidade (contendo o filamento) negativamente carregada, de maneira concentrar os elétrons formados nessa região para que convirja para o alvo no ânodo.

#### 3.4.2. *Ânodo*

Em oposição ao polo negativo, existe o ânodo, ou anteparo, e também conhecido como polo positivo. O ânodo é composto por um bloco (de cobre), que apresenta em sua superfície um alvo, ou ponto/área focal, composto de tungstênio. Algumas características do material que compõe o ponto/área focal são importantes de serem mencionadas. Por ser uma região que receberá o choque de milhares de elétrons, o material que compõe o ponto/área focal deve apresentar um alto número atômico ( $Z=74$ ; permitindo que haja de fato a frenagem dos elétrons sem alterações estruturais do alvo), alto ponto de fusão ( $3422^{\circ}\text{C}$ ; evitar sua fusão devido ao calor gerado pelo choque dos elétrons), boa condutibilidade térmica ( $173\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ; permitir a dissipação do calor, evitando sua concentração) e baixa pressão de vapor (para que não haja formação de gases no interior do tubo). Além disso, para que haja o direcionamento dos fótons de raios X para a janela de vidro do tubo, o ânodo apresenta uma superfície angulada, normalmente em torno de  $20^{\circ}$ . Outra característica importante é que quanto menor for o ponto/área focal, imagens mais nítidas são geradas. Porém, quanto menor o ponto/área focal, uma maior quantidade de calor é gerada. Para superar isso, a angulação de  $20^{\circ}$  do ânodo, conhecida como efeito

Benson, proporciona que o tamanho efetivo da área focal seja menor que o tamanho real da área focal.

### 3.4.3. Fontes de energia

Para que haja a produção dos raios X são necessárias fontes de energia elétrica. No aparelho de raios X podemos identificar duas fontes de energia: transformador de baixa tensão e transformador de alta tensão. Ambos são controlados por um temporizador.

O transformador de baixa tensão está ligado exclusivamente ao cátodo. Sua função é gerar uma corrente elétrica, que é determinada pela miliamperagem (mA) do aparelho, de modo que aqueça o filamento de tungstênio do cátodo e, através do fenômeno de emissão termiônica, haja a formação de uma nuvem de elétrons ao redor do filamento. A temperatura do filamento controla a quantidade de elétrons emitidos, dessa forma, corrente maiores fornecerão maior quantidade de elétrons para a formação dos fótons de raios X. A corrente do tubo empregada em odontologia varia entre 7-15mA.

O transformador de alta tensão está ligado tanto ao cátodo quanto ao ânodo. Dessa maneira, sua função é gerar uma diferença de potencial entre esses dois componentes do tubo de raios X. A quilovoltagem (kV) é quem determina o valor desse potencial, e quando ativado o transformador de alta potência, há a geração de uma grande diferença de potencial entre cátodo e ânodo, o que faz com que os elétrons presentes na nuvem ao redor do filamento de tungstênio do cátodo sejam acelerados contra o alvo no ânodo. O choque desses elétrons contra o alvo e, portanto, sua alteração de velocidade e conversão de energia cinética é o que forma os fótons de raios X. A voltagem do tubo utilizada em odontologia varia entre 50-90kV para aparelhos radiográficos intrabucais e extrabucais, e entre 70-120kV para aparelhos de tomografia.

O temporizador determina por quanto tempo os circuitos elétricos funcionarão. A maioria dos aparelhos, a fim de evitar desgaste do filamento do cátodo, não o mantém pré-aquecido. Desta maneira, ao dar início nos circuitos elétricos para a produção dos raios X, aproximadamente o primeiro meio segundo é utilizado para ativação do circuito de baixa tensão e aquecer o filamento e em seguida há a ativação do circuito de alta tensão, promovendo a aceleração dos elétrons. Neste momento quando se dá ativação do circuito de alta tensão o tempo selecionado no painel de controle para exposição começa a ser

contado e há emissão de um sinal sonoro durante esse processo, indicando a produção dos raios X.

#### **4. PRODUÇÃO DE RAIOS X**

##### *4.1. Passo-a-passo para produção dos raios X*

A produção dos raios X em um aparelho de raios X ocorre da seguinte maneira:

- I.** Aparelho deve estar conectado à rede elétrica e ligado;
- II.** Ao acionar o botão disparador no painel de controle, a corrente elétrica é direcionada ao transformador de baixa tensão;
- III.** O filamento do cátodo é aquecido e forma uma nuvem de elétrons ao seu redor através da emissão termiônica. Os passos II e III acontecem em aproximadamente 0,5 segundo;
- IV.** Há emissão do dispositivo sonoro, durante o qual ocorre a direção da corrente elétrica ao transformador de alta tensão, geração de uma diferença de potencial entre cátodo e ânodo e aceleração dos elétrons contra o ânodo;
- V.** Quando os elétrons atingem o alvo, apenas 1% destes choques geram fótons de radiação X, enquanto 99% geram apenas calor.

##### *4.2. Radiação de frenagem “bremsstrahlung”*

A radiação de frenagem acontece quando há diminuição da velocidade e/ou parada total do elétron ao atingir o alvo de tungstênio do ânodo. Quando o elétron atinge o núcleo de um átomo de tungstênio no alvo, transferindo toda a sua energia cinética e deixando de existir, há formação de fótons por colisão direta. Esse acontecimento é mais raro, mas quando ocorre, toda a energia cinética que o elétron carrega é convertida em um fóton com mesma energia. Quando há deflexão do elétron, este é desacelerado ao passar próximo do núcleo, fazendo com que mude sua trajetória. A produção de radiação por frenagem acontece dessa segunda maneira na grande maioria das vezes. Essa desaceleração de diferentes intensidades, a depender da distância que o elétron passa do

núcleo do átomo de tungstênio, produz fótons de variadas energias. Uma vez defletidos, elétrons continuam a interagir com outros átomos do alvo até perderem toda sua energia cinética.

#### *4.3. Radiação característica*

A radiação característica ocorre quando um elétron incidente desloca ou ejeta um elétron de uma das camadas do átomo do alvo de tungstênio. Quando há essa ejeção, o átomo do alvo fica ionizado (perda de um elétron), deixando um espaço vacante naquela camada das orbitais de elétrons. Em milésimos de segundos, essa vacância é preenchida por um elétron de uma das outras camadas do átomo (normalmente uma camada adjacente mais externa). Entretanto, em diferentes camadas orbitais, os elétrons apresentam diferentes energias. Camadas mais externas possuem elétrons com maiores energias. Portanto, quando um elétron sai de uma camada mais distante para uma mais próxima do núcleo para preencher uma vacância, há liberação de energia “excedente” na forma de fótons de raios X.

A quantidade de energia do fóton gerado pelo “pulo” entre camadas de um elétron é resultado da diferença de energia entre as órbitas envolvidas. Dessa forma, a produção de radiação por esse tipo de fenômeno apresenta valores de energia característicos de acordo com as camadas orbitais envolvidas e o átomo envolvido, o que explica o nome de radiação característica.

#### *4.4. Dissipação de calor*

Como a maioria da energia é transformada em calor, algumas medidas são tomadas para evitar o superaquecimento e fusão dos componentes do tubo de raios X. O alvo está incrustado em um bloco de cobre, responsável por conduzir o calor produzido no ponto/área focal até o óleo isolante no qual os componentes internos do cabeçote estão imersos. Outro método para dissipação do calor de um ponto focal pequeno é o uso de ânodo rotatório. Nesse caso o alvo de tungstênio é um disco chanfrado que rotaciona enquanto o tubo está operando, ou seja, os elétrons atingem áreas sucessivas do alvo e é utilizado quando requer a produção de raios X por um maior intervalo de tempo, por exemplo em exames de tomografia computadorizada multidetectores.

#### *4.5. Filtração e colimação*

A produção dos raios X através da conversão dos elétrons em fótons não ocorre toda da mesma maneira, uma vez que pode ser por frenagem ou característica. Além disso, os elétrons no tubo de raios X são acelerados com diferentes energias cinéticas a depender da rede elétrica e configurações do aparelho, e são desacelerados em diferentes intensidades. Essas diferenças levam a produção de fótons com diferentes energias, ou comprimento de onda, caracterizando o feixe de raios X como um feixe polienergético.

Para fins de diagnóstico, fótons menos energéticos não tem potencial para produção de imagens radiográficas, uma vez que estes não são capazes de atravessar os tecidos até atingir o receptor de imagem, mas ainda podem causar efeitos biológicos. Portanto, é interessante e importante que se filtre o feixe de radiação para eliminar os fótons menos energéticos.

O aparelho de raios X apresenta uma filtração inerente, uma vez que entre o percurso do alvo até a saída do cabeçote existe a janela de vidro do tubo de raios X, o óleo em que o tubo está imerso e o selamento do cabeçote. Além disso, são empregados filtros de alumínio na saída do cabeçote responsáveis por barrar os elétrons menos energéticos (ou de maior comprimento de onda). A filtração total do aparelho deve ser a soma da filtração inerente (equivalente a 0,5 – 1mm de alumínio) e filtração adicional (com uso de discos de 0,5mm de alumínio), e deve ser equivalente à 1,5mm de alumínio para aparelhos operando abaixo de 70kVp e 2,5mm de alumínio para aparelhos acima de 70kVp (ANVISA IN 57).

Mais um fator importante para a configuração do feixe de radiação X é sua colimação. Para isso, o colimador (e/ou diafragma) é empregado na saída do cabeçote, logo após o filtro de alumínio. Estes dispositivos são metálicos, compostos de chumbo, e apresentam uma abertura central com intuito de restringir o tamanho e dar a forma do feixe de radiação barrando os fótons mais divergentes e periféricos, e consequentemente o tecido irradiado do paciente. O colimador deve assegurar, portanto, que o diâmetro do campo de radiação na pele seja de até 6cm (ANVISA IN 57).

#### *4.6. Distância foco-pele*

Após a filtração e colimação, o feixe de radiação se encaminha para a região de interesse, que é direcionada pelo posicionamento do dispositivo/cilindro localizador. O dispositivo localizador é um prolongamento cilíndrico do cabeçote que auxilia

exclusivamente no posicionamento e direção de incidência do feixe de raios X. Podem ser longos (40cm) ou curtos (20cm). A distância foco-pele deve ser de pelo menos 18cm quando o aparelho de raios X opera com 60kVp, no mínimo 20cm operando entre 60-70kVp e no mínimo 24cm quando operado com mais de 70kVp (ANVISA IN 57).

## **EFEITOS BIOLÓGICOS DOS RAIOS X**

### **5. INTERAÇÃO COM A MATÉRIA**

O objetivo final da produção de raios X é a formação de imagens radiográficas com intuito de diagnóstico. Para que haja a formação das imagens, ocorrem interações do feixe de radiação com a matéria, no caso os tecidos do paciente, até que esses fótons atinjam o receptor de imagem ou sejam absorvidos. Quanto maior o número atômico da matéria, maior a probabilidade de interações, por isso existe uma diferença óbvia na densidade radiográfica e no contraste entre os diferentes tecidos vistos nas radiografias. Quando o feixe de raios X deixa o cabeçote e atinge o paciente podem ocorrer os seguintes eventos: os fótons passam através do paciente sem interações; os fótons são completamente absorvidos pelo paciente; ou os fótons podem interagir com os tecidos e se espalhar de duas maneiras.

#### *5.1. Ausência de interações*

A ausência de interação ocorre em 9% das vezes, quando o fóton atravessa completamente os tecidos, sem provocar mudanças nestes, mas sensibilizando o receptor.

#### *5.2. Absorção*

A absorção ocorre quando há total transferência da energia do fóton para os átomos da matéria atingida/tecidos do paciente. Um fato interessante é que a absorção ocorre de maneira similar como é formada a radiação característica, decorrente de um fenômeno chamado “efeito fotoelétrico”. No caso da absorção do fóton de raios X pelos tecidos do paciente, o fóton incidente descarrega toda sua energia para ejetar um elétron

de uma camada mais interna de um átomo dos tecidos do paciente. Ao realizar essa interação, o fóton é considerado como “absorvido” pelo paciente uma vez que deixa de existir. Como um elétron foi ejetado, há uma vacância nas órbitas do átomo do paciente que é rapidamente preenchida por um elétron de outra camada, liberando um novo fóton (radiação característica). O elétron ejetado é denominado fotoelétron, rapidamente absorvido por possuir baixo poder de penetração. Ocorre em cerca de 27% das interações com a matéria.

### *5.3. Espalhamento Compton*

O espalhamento Compton é caracterizado pela colisão do fóton do feixe de raios X com um elétron das últimas camadas orbitais de um átomo dos tecidos do paciente. Os elétrons das últimas camadas apresentam baixa energia de ligação com o núcleo atômico, e são facilmente ejetados, porém isso faz com que o fóton desvie (espalhe) da sua trajetória inicial com menor energia. O fóton incidente continua a interagir com os tecidos do paciente até perder por completo sua energia ou atingir o receptor de imagem. Ocorre em cerca de 57% da interação com a matéria.

### *5.4. Espalhamento coerente*

Outro espalhamento que pode ocorrer é o espalhamento coerente. Neste fenômeno, um fóton do feixe de raios X possuindo baixa energia interage com o átomo, no entanto, não causa nenhum efeito ionizante, ou seja, não ejeta nenhum elétron do átomo, mas apenas transfere sua energia para este átomo e deixa de existir. O átomo fica excitado com a transferência de energia do fóton e, ao voltar ao seu estado normal, libera a energia excedente através da produção de um novo fóton, em outra direção em relação ao fóton incidente. Ocorre em 7% das interações com a matéria.

## **6. EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO**

O uso da radiação X na área de diagnóstico trouxe inúmeros ganhos para a área da saúde. Entretanto, como descrito anteriormente, a radiação X apresenta interação com a matéria e capacidade de ionização, ou seja, os fótons interagem com os átomos da matéria removendo elétrons e levando a formação de íons instáveis. A ação da radiação sobre os tecidos biológicos pode se dar de duas maneiras: através de ação direta ou ações indiretas.

### *6.1. Ação direta*

A ação direta ocorre quando a radiação age de maneira ionizar diretamente a molécula biológica e, ao ionizar essa molécula, há formação de radicais livres representados por um íon hidrogênio e um elétron livre.

Os radicais livres são extremamente reativos, e por isso vão ter vida curta, uma vez que buscam se estabilizar rapidamente. Portanto, os radicais livres podem seguir dois caminhos para se estabilizarem: se dissociando e formando duas moléculas estáveis; ou se ligando a outras moléculas, formando uma nova molécula. Através desse efeito de dissociação ou ligação cruzada geram-se mudanças nas moléculas originais, podendo ser alterações estruturais e funcionais e, por fim, há mudança biológica no organismo. Esses processos são referentes à ação direta que ocorre em cerca de 1/3 das interações com as moléculas biológicas.

### *6.2. Ações indiretas*

As ações indiretas são chamadas assim pois acontecem por intermédio das moléculas de água presentes nos tecidos. Desta maneira, os fótons interagem com as moléculas de água provocando a sua quebra em um íon hidrogênio e um íon hidroxila. Esse processo de quebra da água por meio da radiação, é chamado de radiólise da água.

Os íons hidrogênio e hidroxila também são radicais livres e, portanto, também são reativos e instáveis, e tentam se estabilizar interagindo com moléculas orgânicas dos tecidos. Ao interagir com as moléculas orgânicas, removem-se íons de hidrogênio dessas, o que faz com que as moléculas orgânicas se tornem novos radicais livres. A partir desse ponto, assim como para a ação direta, esses radicais livres instáveis formam moléculas alteradas, na busca por se estabilizarem, levando às mudanças biológicas do organismo.

Além disso, a radiólise da água, quando na presença de tecidos com oxigênio dissolvido, podem levar a formação de outras moléculas, como a hidroperoxila e o peróxido de hidrogênio. Essas moléculas são agentes oxidantes e toxinas primárias para o nosso organismo, então, reagirão com as moléculas orgânicas, levando a mudanças biológicas no organismo irradiado. As ações indiretas são mais frequentes, com ocorrência em aproximadamente 2/3 das interações da radiação com os tecidos biológicos.

A ação direta ocorre na ionização direta de uma macromolécula biológica, já as ações indiretas ocorrem por meio da interação com as moléculas de água, ou seja, a

radiólise da água, que formam radicais livres, e esses radicais formados a partir da radiólise interagem com as macromoléculas biológicas.

### 6.3. *Efeitos no DNA*

O DNA é considerado o componente mais radiosensível de uma célula, portanto, o efeito mais prejudicial da interação da radiação com os tecidos biológicos é quando a molécula afetada é o DNA. A radiação pode ser responsável por modificar a estrutura do DNA de diversas maneiras, como por exemplo a troca de bases hidrogenadas, mas o dano mais importante é a quebra de um ou ambos filamentos do DNA.

Quando há a quebra de um filamento, ou uma fita do DNA, ainda há uma grande chance de reparo, uma vez que a outra fita serve como modelo para que ocorra o reparo pelas proteínas responsáveis. Mas quando há a quebra de ambos os filamentos (esse tipo de dano também pode ser chamado de “*cluster*”), há menor possibilidade de reparo do DNA.

A chance de ocorrer um dano irreversível ao DNA também vai depender do ciclo celular em que a célula se encontra. Se a célula estiver no final da fase S ou em G2, quando o DNA já foi duplicado, caso ocorra um dano em uma das cromátides, há maior possibilidade de reparo. Porém se a lesão ocorrer com a célula em fase G1 ou começo de S, quando o DNA está se preparando para a duplicação, a lesão na fita de DNA pode também ser duplicada, podendo acarretar em falha e atraso na mitose da célula. Essa alteração na molécula de DNA, se não reparada, leva a três possíveis fins: morte da célula, mutação hereditária (quando em células reprodutivas) ou indução do desenvolvimento de câncer, quando atingidas as células somáticas.

A repercussão desses efeitos no organismo são diferenciadas em dois tipos: efeitos determinísticos e efeitos estocásticos.

### 6.4. *Efeitos determinísticos*

Os efeitos determinísticos acontecem devido à morte celular em grande número, induzida pela radiação. Efeitos determinísticos vão ser observados quando a dose de exposição à radiação superar um limiar particular, ou seja, a dose de radiação recebida pelo paciente foi suficiente para causar uma grande quantidade de morte celular e manifestar no tecido. Por outro lado, se a dose de radiação recebida pelo paciente não for superior a este limiar, não há o aparecimento destes efeitos. Outra consideração

importante sobre os efeitos determinísticos é que a gravidade do efeito também aumenta com o aumento da dose. Ou seja, maior dose, maior número de mortes celulares e, portanto, maior gravidade do efeito.

#### 6.4.1. *Efeitos nas células, órgãos e radiosensibilidade*

Nas células, o efeito determinístico, ou seja, quando a dose de radiação passou do limiar, causa a morte celular em massa. A morte celular pode ocorrer devido a danos causados na molécula de DNA ou pelo efeito espectador, onde as células danificadas pela radiação induzem a apoptose das células adjacentes.

Como consequência, esses efeitos serão vistos nos órgãos a curto e longo prazo. A curto prazo, o efeito será determinado pela sensibilidade das células do parênquima do órgão exposto, e geralmente está relacionada à hipoplasia radioinduzida, ou seja, redução do tamanho do órgão devido à perda de células. A longo prazo, essa perda celular é substituída por tecido conjuntivo fibroso e os danos nos vasos refletem com a diminuição da irrigação do tecido, logo, diminuição do oxigênio e dos nutrientes disponíveis.

No que diz respeito à severidade dos efeitos, além da dose, a sensibilidade das células tem uma influência importante. A radiosensibilidade das células está relacionada à seu grau de diferenciação e a taxa de mitose. De acordo com a lei de Bergonié e Tribondeau, a radiosensibilidade do tecido é diretamente proporcional à sua capacidade reprodutiva e inversamente proporcional ao seu grau de diferenciação. Além de tecidos específicos serem mais ou menos radiosensíveis, no geral as crianças que ainda estão em fase de desenvolvimento, apresentam células com alta taxa de mitose, e seus tecidos e órgãos estão em fase de maturação e, por isso, apresentam baixa diferenciação celular. Sendo assim, pessoas mais jovens são mais radiosensíveis que pessoas mais velhas.

#### 6.4.2. *Fatores modificadores*

Além da radiosensibilidade, outros fatores estão relacionados à gravidade dos efeitos determinísticos, chamados de fatores modificadores. São eles: a dose, frequência, oxigênio e transferência linear de energia (LET - do inglês *linear energy transfer*). Apesar da dose de radiação apresentar um limiar clínico para aparecimento dos efeitos, os danos serão proporcionalmente mais severos com seu aumento após o limiar. A frequência de exposição a radiação pode ser alta ou baixa, e as altas frequências estão associadas a maiores danos aos tecidos, pois não há tempo para reparo tecidual. O

oxigênio, assim como nos efeitos indiretos da radiação sobre as macromoléculas orgânicas, leva a formação de toxinas como o peróxido de hidrogênio e a hidroperoxila, logo quanto maior a disponibilidade do oxigênio, maiores os danos no tecido. E por fim a LET quantifica o “poder” da radiação em ionizar a matéria. Portanto, radiações com maior LET, causam mais danos, ou precisam de menor dose, para causar danos significativos.

#### 6.4.3. *Irradiação na cavidade oral*

Na área de atuação da Odontologia, os efeitos determinísticos são vistos em pacientes submetidos ao tratamento de radioterapia na região de cabeça e pescoço. A radioterapia é indicada para os casos de tumores malignos radiosensíveis avançados ou profundamente invasivos e que não haja possibilidade de remoção cirúrgica. A restrição do feixe de radiação ao tumor é difícil, devido aos fatores relacionados a própria lesão, como tamanho, forma, localização e por isso outros tecidos sadios sofrem junto com a radioterapia.

Nos tecidos orais, pode-se observar efeitos determinísticos como a mucosite na mucosa oral, perda do paladar por alterações nas papilas gustativas, redução de fluxo salivar das glândulas salivares, o que pode levar a xerostomia, e por consequência, sem irrigação da saliva e suas propriedades, o aparecimento das “cáries de radiação”. Também há redução de irrigação sanguínea no tecido ósseo, levando a uma maior susceptibilidade à osteorradionecrose e inflamação, fibrose e trismo do tecido muscular.

#### 6.4.4. *Irradiação do corpo todo*

Os efeitos de irradiação de corpo inteiro foram observados a partir de desastres e acidentes nucleares. Entre esses eventos, podemos citar o bombardeamento de Hiroshima e Nagasaki na segunda guerra mundial (1945), o acidente da usina nuclear de Chernobyl (1986), o acidente com Césio-137 em Goiânia (1987) e mais recentemente o acidente na usina nuclear em Fukushima (2011).

Os efeitos da irradiação do corpo todo vão depender da dose de radiação recebida, e são divididos em períodos de ocorrência dos efeitos. O primeiro desses períodos é o período prodrômico, que acontece com exposição acima de 1,5 Gy, e é caracterizado por náuseas, vômitos, diarreia, fraqueza, fadiga e quanto maior a dose, mais rápido vão aparecer esses sintomas. Ele é seguido por um período de latência, com ausência de

sintomatologia. Com doses de 2 a 7 Gy, o indivíduo pode desenvolver a síndrome hematopoiética, com queda dos números de células sanguíneas, o que leva ao aparecimento de infecções, hemorragia e anemia, e pode causar morte em até 30 dias. Em doses maiores de 7 Gy, ocorre síndrome gastrointestinal, com ulceração e hemorragia no intestino, diarreia, desidratação, perda de peso e septicemia, causando morte em duas semanas. E em doses altíssimas, acima de 50 Gy, ocorre a síndrome dos sistemas nervoso central e cardiovascular, com colapso desses sistemas, queda de pressão arterial, estupor, falta de coordenação, desorientação e convulsões.

#### *6.5. Efeitos estocásticos*

O outro tipo de efeito sobre os organismos são os efeitos estocásticos. Diferente dos efeitos determinísticos, os efeitos estocásticos acontecem por danos subletais ao genoma das células. Ou seja, ele não vai provocar a morte das células, mas uma alteração estrutural no DNA. Estes efeitos não possuem uma dose limiar, logo qualquer dose de radiação é potencial para gerar esse efeito, mas sua probabilidade de acontecimento é relacionada com a dose. Quanto maior a dose (e sua frequência), maior a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos. Enfatize-se aqui que estamos falando em probabilidade de ocorrência do efeito estocástico, não sendo possível afirmar que estes acontecerão, independentemente da dose e frequência. Portanto, vale salientar que na prática odontológica as doses de radiação empregadas estão muito abaixo dos limiares de aparecimento de efeitos determinísticos, sendo então os efeitos estocásticos de maior significância. Os efeitos estocásticos são distintos em células somáticas e células reprodutivas.

##### *6.5.1. Carcinogênese*

A modificação que acontece no DNA de células somáticas pode levar a indução ou formação de neoplasias, ou pela ativação de oncogenes, ou pela inativação dos genes supressores da formação de câncer. Acredita-se na carcinogênese radioinduzida pela observação das taxas de incidência de câncer comparando-se populações expostas com populações não expostas. Entretanto, os dados acerca da carcinogênese radioinduzida são estimados, uma vez que não é possível realizar a diferenciação entre os cânceres radioinduzidos ou induzidos por outras causas.

##### *6.5.2. Hereditário*

Quando as células expostas são as células reprodutivas, o efeito pode ser visto nos descendentes dos pacientes irradiados, que são os chamados efeitos estocásticos hereditários. Na Odontologia esse efeito estocástico é menos importante do que a carcinogênese pelo fato das baixas doses de exposição (ou nulas) nas gônadas na prática odontológica. Até hoje nenhum dano genético relacionado à radiação foi demonstrado.

## **7. DOSIMETRIA**

Radiação é energia em movimento, portanto, ela está presente em diversos aspectos da nossa vida além da radiação dos exames para diagnóstico. São diversas as fontes de radiação, mas podemos dividi-las em duas origens: naturais e artificiais (produzidas pelo homem). As fontes naturais por sua vez, são provenientes de elementos radioisótopos, como radônio e torônio, amplamente presentes no nosso planeta, radiação terrestre emitida pelos radionuclídeos presentes da crosta terrestre, interna pela ingestão de radionuclídeos na nossa alimentação e cósmica vinda do espaço sideral. As fontes de radiação produzidas pelo homem estão relacionadas principalmente ao diagnóstico por imagem.

Visto a grande exposição a radiação que estamos potencialmente submetidos, viu-se a necessidade de estudar grandezas envolvidas com a radiação e medidas para aferir as doses, que é o estudo da dosimetria. Diversas doses e cálculos existem para as mais variadas medidas de dose de radiação.

### *7.1. Dose absorvida*

A dose absorvida quantifica a quantidade de energia de radiação absorvida por unidade de massa. A sua fórmula é a razão entre a energia média depositada num ponto P, e a massa desse meio onde foi depositada. É medida em Grays (Gy).

### *7.2. Dose equivalente*

A dose equivalente é a quantidade de energia de radiação absorvida, considerando o tipo de radiação, pois elas possuem LETs diferentes. Na sua fórmula,  $H_t$ , é o produto entre a dose absorvida (D) e o fator de ponderação do tipo de radiação (que é 1 para a radiação X). É expressa em sieverts (Sv).

### *7.3. Dose efetiva*

A dose efetiva vai avaliar o risco da radiação, considerando tipo de radiação e os tecidos e órgãos expostos. Para tal, existe a ponderação tecidual que é aplicada na fórmula, onde a dose efetiva  $E$ , é igual ao produto da soma das ponderações teciduais pela dose equivalente. Também é expressa em sieverts (Sv).

## **8. RADIOPROTEÇÃO**

Sabendo-se dos riscos que a radiação oferece e sendo possível estimar suas grandezas através da dosimetria, estabeleceram-se diretrizes nacionais e internacionais para a radioproteção. O objetivo da radioproteção é a prevenção ou diminuição da chance de ocorrência dos efeitos somáticos e redução da possível deterioração genética.

### *8.1. Princípios da radioproteção*

Três princípios norteiam a radioproteção. A limitação de dose, a otimização e a justificativa.

A limitação de dose tem como objetivo a limitação da probabilidade de efeitos estocásticos, uma vez que para o público geral os efeitos determinísticos são improváveis de ocorrer. Seguindo a hipótese “linear não limiar”, ou LNT, acredita-se que exista uma relação linear positiva entre a dose de radiação que uma pessoa é exposta e a chance de desenvolver câncer, e também que não haja limiar, ou seja, não existe dose segura. Apesar de em doses baixas (menores que 0,1mSv) não existir evidência científica, essa teoria é amplamente aceita. Portanto, foram determinados limites de doses de radiação anuais pelos órgãos responsáveis pela radioproteção internacional e nacional, tanto para os indivíduos que trabalham com radiação, quanto para o público geral. Os limites são de 20mSv para indivíduos ocupacionalmente expostos e 1 mSv para o público em geral. Com ressalva de que para as mulheres grávidas e expostas ocupacionalmente, essa dose seja de 1mSv. Esses valores são referentes a média aritmética de 5 anos seguidos, desde que em nenhum ano tenha-se doses maiores que 50mSv. Notar que não há limites de dose para o diagnóstico e tratamento por radioterapia, uma vez que a exposição que é proposta intencionalmente visa benefícios diretos ao paciente, acima de qualquer possível dano. Mas a preocupação levou ao estabelecimento dos Níveis de Referência para Diagnóstico, que são valores que representam os limites superiores aceitáveis para a exposição de um paciente.

O princípio da otimização determina que devemos lançar mão de todos os meios possíveis para reduzir a dose para os pacientes, funcionários e dentistas. E aqui entram três acrônimos amplamente abordados na literatura, que são o ALARA (*as low as reasonably achievable*), ALADA (*as low as diagnostically acceptable*) e ALADAIP (*as low as diagnostically acceptable being indication-specific and patient-oriented*), onde o primeiro traz que as doses devem ser tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, o segundo, que é uma adaptação, as doses devem ser tão baixas quanto diagnosticamente aceitáveis, e a última versão que as doses devem ser ajustadas também de acordo com a indicação do exame e características do paciente em si. Portanto, ao seguir o princípio da otimização, devemos ajustar os parâmetros cabíveis para a realização do exame de maneira que consigamos obter imagens de qualidade suficiente para o diagnóstico e ainda assim expor o paciente a menor dose de radiação possível.

Por fim, o princípio da justificativa traz que a exposição do paciente à radiação ionizante deve ser justificada em relação às outras alternativas, visando o benefício para o paciente, ou seja, o benefício deve superar o risco. Dessa maneira, todo e qualquer exame complementar por imagem (com ênfase naqueles que utilizam radiação ionizante) deve ser justificado ao ser indicado. O princípio da justificativa serve de base para a discussão acerca da prescrição dos exames de imagem: quando indicar e qual exame indicar.