

Los gradientes de presión rigen el flujo sanguíneo cardíaco

Este capítulo trata del movimiento de líquidos, el flujo sanguíneo a través del corazón y los vasos sanguíneos en un bucle sin fin. Pero antes de entrar en detalles, tenemos que tratar un tema importante: *¿cómo fluye la sangre?* La respuesta corta es que la sangre fluye gracias a un **gradiente de presión** (cap. 1), una diferencia de presión entre dos zonas. Ya sea desde una cámara del corazón a la siguiente o a lo largo de una arteria, la sangre siempre se está moviendo por un gradiente de presión de una región de alta presión a una región de menor presión.

Son dos los mecanismos que crean gradientes de presión en el aparato cardiovascular:

- Se fuerza la entrada de sangre adicional en un compartimento.
- El músculo que rodea el compartimento se contrae.

Piense en un globo lleno de agua. Si se añade más agua, aumentará la presión en el interior del globo. Al final, la presión será mayor de lo que la pared del globo puede resistir. El globo estallará y el agua fluirá hacia donde se le permite, desde el interior hacia el exterior. Otra opción es comprimir la pared con las manos lo suficiente como para producir el mismo resultado: aumentar la presión interna y causar la ruptura de la pared. Del mismo modo, la presión de un líquido en un compartimento del corazón (p. ej., la aurícula izquierda) puede aumentarse llenándola con mayor cantidad de sangre o mediante la contracción de la pared de la aurícula que presiona el compartimento. Cuando la presión en la aurícula es mayor que la presión en el ventrículo adyacente, la sangre fluye desde la aurícula al ventrículo.

Apuntes sobre el caso

11-1 ¿Tuvo Bob W. problemas con su corazón, sus vasos sanguíneos o ambos?

11-2 Parte del ventrículo izquierdo de Bob W. no podía contraerse. ¿Qué efecto tiene este hecho sobre el gradiente de presión entre el ventrículo izquierdo y la arteria que sale del corazón?

Examen sorpresa

11-1 Verdadero o falso: todo vaso sanguíneo que lleva sangre desde el corazón es una arteria.

11-2 ¿Qué circulación transporta el oxígeno a los huesos de la mano, la pulmonar o la sistémica?

11-2 Indicar el tipo de gradiente que rige el flujo sanguíneo a través de los vasos y cavidades del corazón.

Estructura y función del corazón

El corazón se encuentra entre los pulmones, por delante de la columna vertebral, por encima del diafragma y por debajo del borde superior del esternón (fig. 11-2 A). Tiene el tamaño y la forma de un puño cerrado, dos tercios de los cuales se encuentran a la izquierda de la línea media. El estrecho *vértice* o zona apical apunta hacia abajo y hacia fuera, hacia la cadera izquierda. La *base*, más ancha, se encuentra opuesta al vértice, donde los grandes vasos se unen al corazón.

El corazón se encuentra en un saco cerrado flexible, el **pericardio**, que tiene aproximadamente de 1 mm a 2 mm de espesor. Está formado por dos capas (fig. 11-2 B y C). La capa gruesa externa, el *pericardio fibroso*, está anclada por abajo al diafragma y por encima a los grandes vasos, donde se adhiere a la base del corazón. La capa interna, el *pericardio seroso*, se repliega sobre sí misma para formar una membrana de dos capas que recubre la superficie interna del saco, así como la superficie del corazón en sí. La capa de pericardio seroso unida al pericardio fibroso es la *capa parietal*; la capa que cubre el corazón es la *capa visceral* o *epicardio*. El espacio potencial entre estas dos capas del pericardio seroso es la *cavidad pericárdica*. En la figura 1-14 puede verse cómo se forma este espacio durante el desarrollo fetal. Las células del pericardio seroso secretan una pequeña cantidad de *líquido pericárdico*, un lubricante que permite que las dos capas serosas se deslicen una sobre la otra, conforme el corazón se mueve con cada latido.

En algunas circunstancias, el espacio potencial de la cavidad pericárdica se convierte en un espacio real lleno de líquido; por ejemplo, cuando se inflama el pericardio (pericarditis) y se acumula líquido inflamatorio. En algunos casos, el líquido acumulado puede comprimir el corazón e impedir que se dilate y se contraiga correctamente.

La pared del corazón tiene tres capas

Prácticamente todo el espesor de la pared del corazón, y por tanto toda la masa del corazón, está formada por músculo cardíaco o **miocardio** (fig. 11-2 C), que se trata con más detalle a continuación.

La capa más externa de la pared del corazón es el **epicardio**, que en realidad es lo mismo que la capa visceral del pericardio seroso comentada antes. La capa interna de la pared del corazón, el **endocardio**, tiene sólo unas pocas células de espesor y representa una continuación de las células similares que tapizan todos los vasos sanguíneos. Las células epiteliales planas del endocardio son las únicas células de la pared del corazón que están en contacto directo con la sangre. Al igual que en los vasos sanguíneos, estas células forman una superficie lisa libre de fricción para asegurar un flujo uniforme y evitar la formación de coágulos en la sangre (cap. 10).

La pared es delgada donde forma las aurículas, de unos 2 mm a 3 mm. La pared del ventrículo derecho tiene de 4 mm a 5 mm de espesor. Por el contrario, la pared del ventrículo izquierdo tiene de 11 mm a 13 mm de espesor,

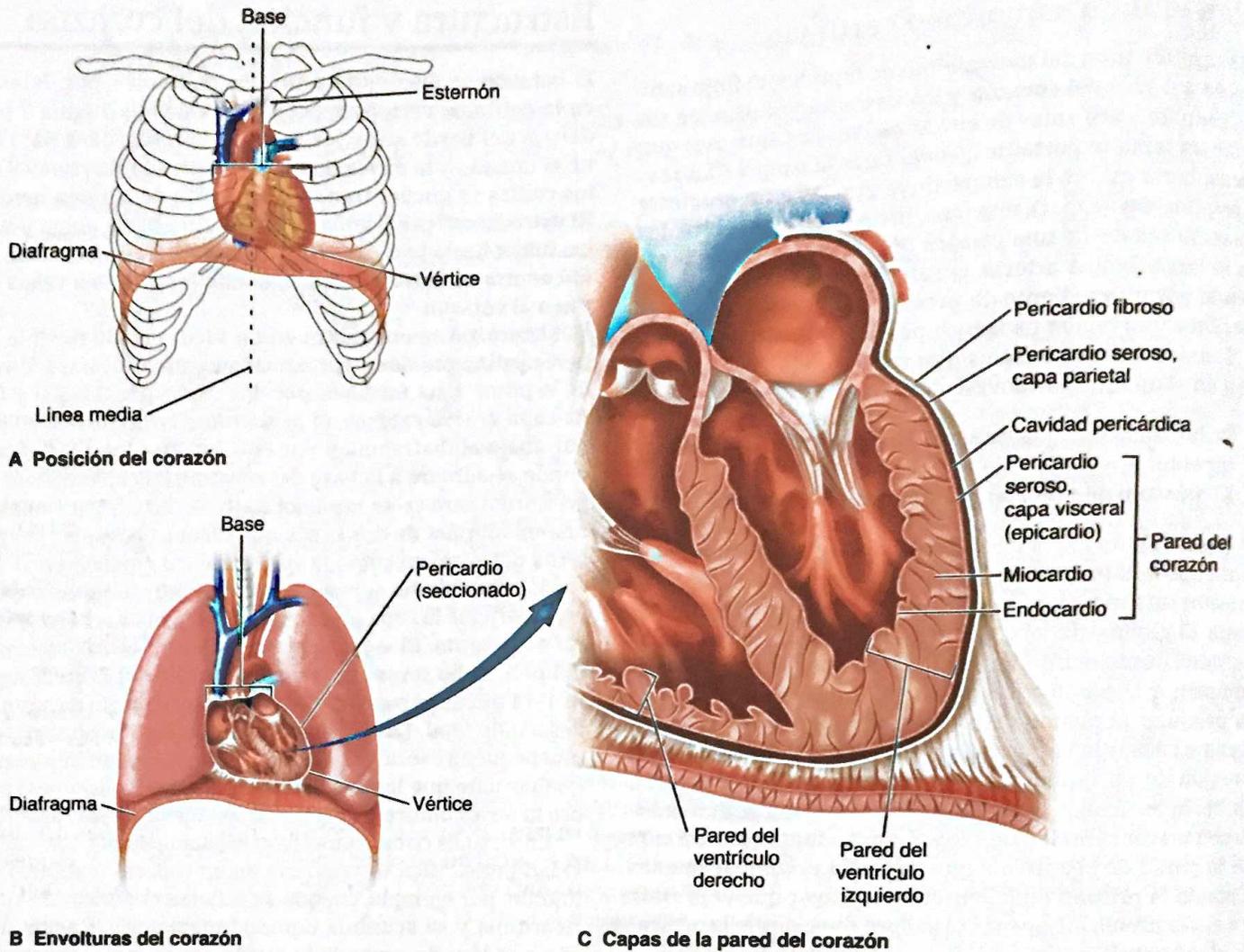


Figura 11-2. El corazón y su recubrimiento. A) El vértice cardíaco (zona apical) apunta hacia la cadera izquierda y la base del corazón hacia la parte posterior del hombro derecho. B) El corazón está firmemente unido al diafragma y los principales vasos sanguíneos por el pericardio. C) La pared del corazón está formada por tres capas y está rodeado por el pericardio. ¿Qué capa del pericardio es parte de la pared del corazón?

lo que refleja su capacidad de producir la fuerza suficiente para impulsar la sangre desde el corazón a los dedos del pie.

Apuntes sobre el caso

11-3 El músculo cardíaco de Bob estaba lesionado. ¿Qué capa del corazón estaba afectada?

Un esqueleto fibroso proporciona aislamiento y soporte

Una característica importante de la pared del corazón es el *esqueleto fibroso*, formado por tejido conjuntivo denso. En el miocardio es una malla que sirve para unir entre sí las fibras musculares cardíacas. Sin embargo, en la zona de unión entre las aurículas y los ventrículos se condensa en un plano de tejido fibroso y separa las aurículas, por

encima, de los ventrículos, por debajo (v. fig. 11-5 A). Con una única excepción importante, esta capa de tejido fibroso proporciona aislamiento eléctrico de las aurículas con los ventrículos. La excepción es un haz de músculo cardíaco especializado que forma parte del *sistema de conducción cardíaca*, que se comenta más adelante, que penetra en el tejido fibroso para llevar las señales eléctricas de las aurículas a los ventrículos.

El músculo cardíaco tiene propiedades únicas

Los miocitos cardíacos (células musculares) se organizan en capas concéntricas que envuelven el corazón (fig. 11-3, izquierda). Esta disposición les permite exprimir la sangre fuera del corazón, como la pasta de dientes del tubo de dentífrico. El músculo cardíaco comparte algunas características con el músculo liso esquelético. Al igual que

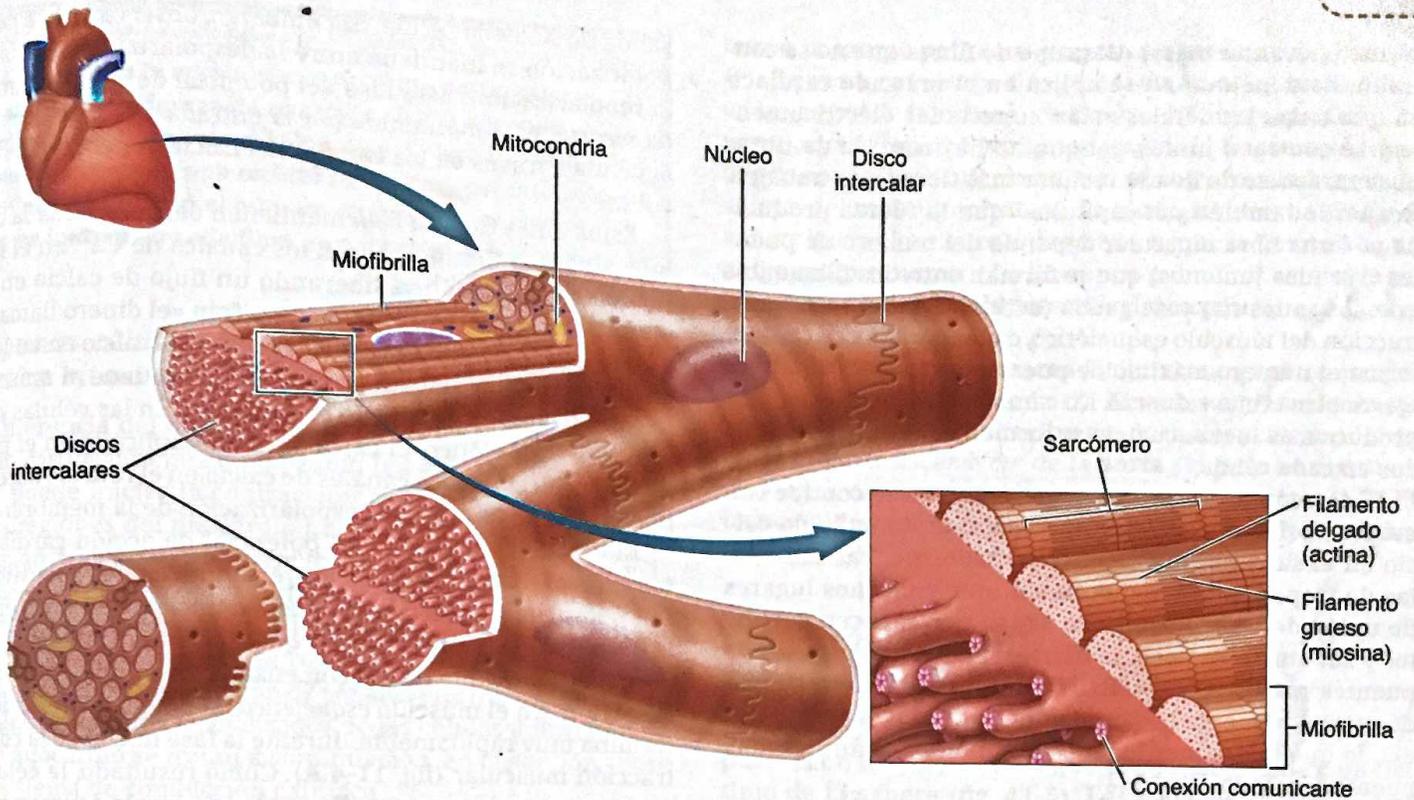


Figura 11-3. Músculo cardíaco. Las células del músculo cardíaco se unen extremo a extremo mediante los discos intercalares. ¿Para qué sirven las conexiones comunicantes, para mantener las células unidas físicamente o para emparejar las células eléctricamente?

el músculo esquelético, el músculo cardíaco es *estriado*, ya que sus miofilamentos se organizan en sarcómeros, cada uno con una distribución ordenada de los filamentos finos y gruesos (fig. 11-3). El músculo cardíaco también se regula de manera similar al músculo esquelético, mediante la unión del calcio a la troponina, lo que libera los lugares de unión a la miosina de las moléculas de actina de los filamentos delgados. Sin embargo, el músculo cardíaco y el esquelético difieren estructural y funcionalmente de forma considerable

Las células del corazón están acopladas eléctricamente

Las fibras musculares *esqueléticas* están eléctricamente aisladas unas de las otras; una fibra puede contraerse mientras la fibra adyacente se relaja. Por el contrario, las fibras musculares *cardíacas* están interconectadas y las señales eléctricas pasan fácilmente entre ellas. Las células cardíacas tienen múltiples extremos romos que enlazan una célula con otra en lugares aplanados denominados *discos intercalares* (fig. 11-3, derecha). Cada disco intercalar contiene conexiones comunicantes, diminutos túneles llenos de líquido, que permiten a los iones transmitir las señales eléctricas directamente de célula a célula. Como resultado, el corazón se comporta como el músculo liso: una onda de contracción viaja rápidamente a través de las células musculares cardíacas. Sin embargo, vale la pena recordar que la onda no se propaga directamente desde las células del músculo auricular a las células del músculo ventricular. En

su lugar, la señal se canaliza a través de las fibras del sistema de conducción cardíaco, que penetran en el esqueleto fibroso, que actúa de aislante eléctrico y separa las aurículas de los ventrículos.

La fuerza de la contracción cardíaca depende del número de puentes cruzados

En determinadas circunstancias, como durante el ejercicio, se requieren contracciones cardíacas más fuertes con el fin de impulsar más sangre. Sin embargo, el mecanismo para conseguir contracciones más fuertes en el músculo cardíaco es diferente del utilizado por el músculo esquelético. Para ilustrar la diferencia, piense en un equipo de trabajadores que mueven un cargamento de cajas. En el músculo esquelético, cada trabajador realiza siempre el máximo esfuerzo, pero el número de trabajadores varía. Un trabajador (es decir, una fibra muscular) podría levantar una caja ligera, mientras que una caja pesada tendría que ser levantada por muchos trabajadores (es decir, muchas fibras musculares). Por el contrario, en el músculo cardíaco todos los trabajadores trabajan siempre juntos. Cada trabajador realiza un poco de esfuerzo para levantar una caja ligera o un esfuerzo mayor para levantar una caja pesada.

Así es como funciona. Hay que recordar que las fibras del músculo esquelético no están conectadas eléctricamente y que cada contracción es «todo o nada», la contracción de unas pocas fibras produce una fuerza pequeña. Para obtener más fuerza se requiere la contracción de más fibras, que deben reclutarse mediante un esfuerzo cons-

ciente («levantar más») del grupo de fibras que no se contraen. Este método no se aplica en el músculo cardíaco, ya que todas las células están conectadas eléctricamente y se contraen juntas, así que no hay reserva de fibras no contractiles de donde reclutar más fibras que trabajen. Recuerde también del capítulo 7 que la fuerza producida por una fibra muscular depende del número de puentes cruzados (uniones) que se forman entre los filamentos gruesos (miosina) y delgados (actina). Durante una contracción del músculo esquelético, cada fibra que se contrae forma el número máximo de puentes cruzados, cada fibra ejerce el máximo esfuerzo. En cambio, el músculo cardíaco produce más fuerza cuando se forman más puentes cruzados en cada célula.

El corazón de una persona en reposo no se contrae con mucha fuerza porque hay una cantidad limitada de calcio en el sarcoplasma. Como resultado, muchas moléculas de troponina permanecen sin unir y muchos lugares de unión de las moléculas de actina permanecen cubiertos y sin unirse; es decir, se han formado pocas uniones de puentes cruzados. Sin embargo, el ejercicio (u otros tipos de estrés) aumenta la cantidad de calcio en el sarcoplasma, lo que libera más lugares de unión para formar más puentes cruzados.

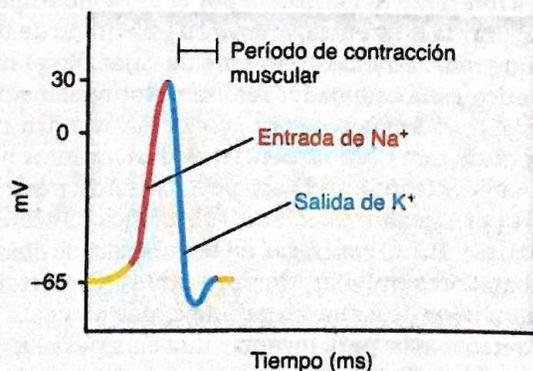
El calcio mantiene los potenciales de acción del miocardio

Los potenciales de acción del miocardio difieren de los potenciales de acción del músculo esquelético en dos aspectos. Como puede verse mediante la comparación de las partes A y B de la figura 11-4, el potencial de acción del miocardio dura mucho más tiempo y el calcio tiene una función importante. La despolarización inicial del músculo cardíaco, al igual que en el músculo esquelético, se produce como resultado de la entrada de Na^+ a través de canales dependientes de voltaje. La fase final de repolarización del potencial de acción es también familiar y se debe a la

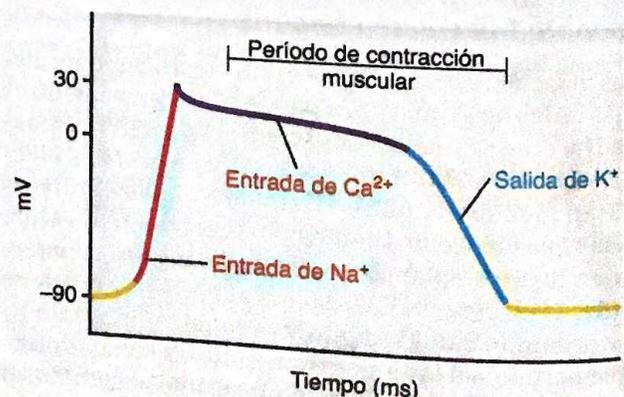
salida de K^+ de la célula. Sin embargo, observe que la despolarización se mantiene entre la despolarización inicial y la repolarización. Esta fase del potencial de acción, llamada *meseta*, está mantenida por la entrada de iones Ca^{2+} en la célula a través de los canales del calcio dependientes de voltaje.

Estos iones Ca^{2+} no sólo mantienen despolarizada la célula, sino que también abren los canales de Ca^{2+} en el retículo sarcoplasmático, liberando un flujo de calcio en el citoplasma. Como en el conocido refrán «el dinero llama al dinero», la dosis inicial de calcio libera más calcio en un bucle de retroalimentación positiva que mantiene al músculo cardíaco en un estado de contracción. En las células del músculo esquelético, el calcio *no* está implicado en el potencial de acción y los canales de calcio en el retículo sarcoplasmático se abren por despolarización de la membrana.

El carácter distintivo del potencial de acción cardíaco también afecta al intervalo entre contracciones sucesivas. Los potenciales de acción no pueden iniciarse en una célula despolarizada, es decir, tiene que terminar el potencial de acción antes de que pueda comenzar un segundo potencial de acción. En el músculo *esquelético*, el potencial de acción termina muy rápidamente, durante la fase inicial de la contracción muscular (fig. 11-4 A). Como resultado, la célula está lista para otra contracción antes de que la contracción en curso se haya completado, una disposición que facilita contracciones suaves y constantes llamadas *contracciones tetánicas* (v. fig. 7-12). Por el contrario, los potenciales de acción *cardíacos* duran mientras el músculo cardíaco está contraído (fig. 11-4 B). Recordemos que, en el músculo esquelético, un ciclo individual de contracción y relajación se llama *contracción muscular*. El largo potencial de acción cardíaco significa que una contracción muscular es la única forma de contracción del músculo cardíaco; nunca se produce la contracción tetánica, un estado de contracción prolongado. Todas las cámaras del corazón se relajan totalmente entre contracciones, dando tiempo suficiente para que se produzca el llenado.



A Potencial de acción del músculo esquelético



B Potencial de acción del músculo cardíaco

Figura 11-4. Potenciales de acción del músculo cardíaco. A) El potencial de acción en las células del músculo esquelético es de corta duración. B) El potencial de acción de las células musculares cardíacas tiene un período de meseta extendido. ¿Qué ión participa en el potencial de acción del músculo cardíaco pero no en el del esquelético?

Algunas células del miocardio tienen ritmo propio

A diferencia del músculo esquelético, una parte del músculo cardíaco tiene ritmo propio (es autorrítmico), es decir, puede iniciar la contracción sin un estímulo externo. Las regiones del miocardio que poseen esta capacidad se llaman *miocardio autorrítmico*. Aquí las células son más pequeñas que en el resto del miocardio (las del *miocardio contráctil*, que acabamos de mencionar). Las células autorrítmicas del miocardio se contraen muy débilmente, pero destacan en la transmisión de señales eléctricas. Los potenciales de acción especializados de las células autorrítmicas del miocardio se tratan a continuación, en la sección sobre el sistema de conducción cardíaca.

El músculo cardíaco produce energía de forma aerobia

Otra característica única del músculo cardíaco es que se basa exclusivamente en el metabolismo aerobio, y por tanto está repleto de mitocondrias. El músculo cardíaco quemará casi cualquier cosa para obtener energía: glucosa, aminoácidos, ácido láctico o cualquier otro tipo de nutriente disponibles, de modo que la disponibilidad de oxígeno (no la de nutrientes) es el factor limitante en el metabolismo energético cardíaco. No se fatiga en condiciones normales, pero puede hacerlo como consecuencia de una enfermedad.