

# Tema de actualidad

## Estructura funcional de la pared miocárdica. Evolución histórica de su conocimiento y bases experimentales para un modelo de simulación dinámico-funcional. Parte I

HUGO E. CASTAGNINO, FAUSTO A. TORANZOS, RICARDO MARINO, JUAN CABELLO

Departamento de Clínica Médica, Hospital Escuela José de San Martín, Facultad de Medicina, y Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

Trabajo recibido para su publicación: 7/88. Aceptado: 11/88

Dirección para separatas: Av. Córdoba 2351, 11º Piso, (1120) Buenos Aires, Argentina

*El diseño de un modelo experimental, con una base matemática que represente la estructura de la pared ventricular y su dinámica, es de gran utilidad para el estudio de ciertas enfermedades que se caracterizan por algún tipo de alteración parcial de componentes parietales en sus fases iniciales. Previo a lo anterior, es imprescindible ilustrar brevemente la evolución conceptual hasta el presente sobre la anatomía parietal y la posible interrelación de sus componentes durante la dinámica cardíaca, en condiciones normales y patológicas. Esta revisión permitirá demarcar con nitidez las limitaciones y posibilidades de los modelos que se diseñen. A partir de un modelo funcional de las espirales musculares miocárdicas diseñado por Borelli en el siglo XVIII, se ha evolucionado lo suficiente en los conocimientos como para delimitar con precisión las posibilidades que se poseen hoy para representar funciones y efectos de la dinámica parietal y extender esos conceptos a ciertas tentativas de aproximación a enfermedades determinadas. Del análisis surge también con claridad que no es posible simplificar tampoco, sin gruesos errores, algo que es ya muy complejo en lo estático y a lo que es necesario agregarle el componente dinámico. Tomado en cuenta adecuadamente lo anterior, el empleo de ciertos modelos geométricos y una apropiada graficación visual son de utilidad para representar algunos de los fenómenos analizados y servir de base para otros futuros modelos funcionales. El ecocardiograma bidimensional y el movimiento de las arterias coronarias, como pueden observarse en una cineangiografía, pueden avalar también algunos de los conceptos enunciados*

*sobre ciertos aspectos de la dinámica cardíaca. En el aspecto clínico hay dos enfermedades que pueden considerarse particularmente apropiadas para encarar el estudio dinámico parietal con esta metodología, los aneurismas de ventrículo y la miocardiopatía hipertrófica primaria. Se pasa revista a la evolución conceptual sobre la estructura parietal miocárdica y su dinámica y se presentan diseños posibles para su representación. Algunos de ellos fueron adoptados a partir de un diseño que fuera ya utilizado en un estudio sobre formación de aneurismas ventriculares en sus fases precoces, a partir de una teoría de un fenómeno elástico-compresivo activado por stress. La elaboración de modelos, una vez cumplidos los requisitos analizados, tiene finalmente la ventaja adicional de proponer y facilitar varios caminos de razonamiento en el estudio de un fenómeno determinado.*

Se sabe desde muy antiguo que la conformación estructural de la pared miocárdica posee una relación directa con el tipo de función de la misma, cuyo efecto final es asegurar una eficaz contracción y dilatación cíclicas para un adecuado vaciamiento y lleno ventriculares.<sup>1</sup>

Sir Arthur Keith, en una conferencia Harvey, afirmó que ninguna teoría funcional puede ser verdadera a menos que produzca una explicación acabada de todos los puntos correspondientes de la estructura y se preguntó también: ¿De qué magnitud será aún nuestra ignorancia en la descripción de la estructura del corazón de mamífero?<sup>2</sup>

A pesar de los numerosos estudios efectuados al respecto utilizando diversas técnicas, persisten



hasta la actualidad serias dificultades para correlacionar con precisión y certeza el componente anatómico parietal estricto y su consecuente modificación con la función. Ha conspirado para ello la tardía comprensión de la disposición verdadera de los helicoides fibrilares cardíacos, su variabilidad regional y la hasta hoy parcialmente desconocida forma completa de ensamble del sinsicio cardíaco.

Conocemos y podemos medir perfectamente en la actualidad el grado cuantitativo de contractilidad y la eficiencia resultante de esa función. Poseemos medios cruentos e incruentos de gran precisión para efectuar y aplicar en la práctica todos esos cálculos que tienen un enorme valor en la rutina cardiológica clínica. Sin embargo, la actividad funcional del ventrículo debe ser considerada también, tomando en cuenta la actividad de las partes constitutivas de la pared ventricular con sus modificaciones. La pared ventricular está muy lejos de ser una estructura simple, ya que presenta una particular configuración de las capas musculares en su espesor y orientación. Las relaciones e interacciones entre sus partes constitutivas son complejas y mal conocidas, muy particularmente en su aspecto dinámico, dado que dichas relaciones e interacciones se modifican cíclicamente durante la contracción. Un estudio anatómico estático no agrega información en este respecto. Es precisamente en este tema en el que puede percibirse con claridad el hiato aún considerable que existe entre una eventual correlación, todavía parcial, de lo conocido sobre estructura estática de la pared ventricular y el movimiento complejo de la misma.

Ninguna representación macroscópica anatómica expresará claramente lo que ocurre en la intimidad fibrilar durante el movimiento.

El interés por lo analizado arriba no es sólo académico sino que tiene relación directa en la comprensión de ciertas patologías que de algún modo afectan esa matriz especial en forma primordial, ya sea en parte o en el todo.

En otros trabajos hemos encarado el estudio de las fases tempranas de la formación de los aneurismas de ventrículo, cualesquiera fueran sus etiologías; adoptamos al efecto un modelo geométrico-dinámico teórico, con un esquema fisiopatológico común para los períodos precoces de la formación del aneurisma. Cobra especial importancia en nuestro análisis la incorporación del movimiento cíclico y su relación causal sobre el efecto deletéreo de un sector de fibras físicamente alteradas que sigue actuando de ma-

nera diferente dentro de un entorno celular normalmente contráctil.<sup>3-6</sup>

En otro orden de cosas, y ya en un plano teórico puro, una entidad como la miocardiopatía hipertrófica obstructiva primaria o secundaria, generada por la alteración en la disposición fibrilar —caracterizada por una pérdida de la ordenación arquitectónica en sus múltiples formas y localizaciones—, posee en el aspecto funcional los problemas básicos conocidos de contractilidad junto a otra manifestación no menos importante, como es la isquemia miocárdica sin alteraciones significativas de la red coronaria troncular epicárdica, en sus comienzos. No hay dudas de que esa arquitectura y contractilidad alteradas actúan negativamente a veces durante la contracción, sobre el flujo sanguíneo del terminal coronario intramiocárdico. Esto es por otra parte un hecho clínico bien conocido.

Para encarar las cuestiones mencionadas debemos adoptar un enfoque original, teniendo en cuenta las dificultades analizadas, para aproximarnos a los fenómenos en estudio. Consideramos ilustrativo entonces hacer un rápido pasaje de lo que lenta y parcialmente se ha ido conociendo sobre la estructura parietal miocárdica. Hasta hoy persisten errores anatómicos transmitidos, por eso es conveniente pasar revista a la evolución conceptual hasta lo que sabemos hoy.

#### EVOLUCION HISTORICA

Harvey en el siglo XVII, y luego Lower, resaltaron la configuración helicoidal de las fibras musculares del miocardio. La detallada descripción hecha por Lower al respecto ha perdurado casi hasta la actualidad.

Senac, en Francia,<sup>7</sup> se ocupó también de esta estructura en el siglo XVIII y su obra está profusamente ilustrada al respecto. No hubo de estos ilustres autores, sin embargo, más que una vaga proyección teleológica, esto es, el especular, a partir del límite máximo de la observación, la consecuencia funcional probable desde la base antedicha, en cuanto al probable significado de la estructura que observaban.

En el mismo siglo XVIII Giovanni Alfonso Borelli,<sup>1</sup> profesor de matemáticas y biólogo de las Universidades de Bologna y de Pisa, publicó en 1732 *De Motu Animalium*. En este libro están sus estudios y análisis sobre la anatomía y función de los músculos del aparato locomotor. Dedicó una sección especial exclusivamente al miocardio y su función. Lo verdaderamente novedoso para esa época fue el enfoque múltiple

del problema, ya que Borelli enfocó el aspecto biológico funcional con una base matemática y geométrica que aplicó especulativamente para el estudio de las interrelaciones funcionales de las capas musculares helicoidales del corazón. Acompañó las descripciones con abundantes gráficos y observaciones experimentales y diseñó algunos modelos comparativos para asimilar la estructura y función cardíacas con otros mecanismos simples. Aún son de utilidad algunos de esos conceptos, tales como la interrelación de las espirales fibrilares del miocardio durante las dilataciones bruscas ventriculares, en las que la superposición de los helicoides ejerce un efecto de protección desde adentro hacia afuera, es decir, el sentido y dirección de las fuerzas que llevarían a una dilatación brusca parietal. Comparó la configuración del corazón con la disposición fibrilar de un ovillo hueco; comprobó en animales la fuerza de constricción a la manera de un anillo de los músculos durante la sístole ventricular. Los geniales trabajos de Borelli constituyen uno de los primeros y más notables ejemplos de creación de un modelo

geométrico-funcional para el estudio de la función de la pared miocárdica (Fig. 1).

El análisis histórico-epistemológico de la producción de Borelli reafirma nuestra convicción de que si en su época era posible reunir en una persona el conocimiento profundo de la Biología y la Matemática, hoy es imprescindible el trabajo multidisciplinario para una acción eficaz en problemas tan complejos como el que tratamos.

Durante el siglo XIX se logró una consolidación de los conceptos sobre estructura espiral de los músculos cardíacos en base a lo descrito por Lower. Durante este período no se elaboraron nuevas teorías o modelos funcionales sobre la estructura miocárdica. Las ilustraciones de Bourgery ilustran al respecto y estas figuras clásicas acompañaron en general a los tratados de anatomía moderna hasta la primera mitad del siglo XX (Fig. 2A). En la Figura 2B, perteneciente al mismo autor, es posible observar en el esquema del esqueleto de los espirales básicos de los ventrículos un notable adelanto para la época; se trata de la torsión sobre sí mismos de los espirales en la punta y no de una inserción en ese mismo lugar, tal como hasta la actualidad suponen algunos, erróneamente.

Desde el punto de vista del espesor parietal, el concepto estructural básico, que en lo general persiste hasta hoy, es la configuración de tres capas de fibras con orientación diferente, las extremas, interna y externa, dispuestas a más de  $45^\circ$ , y la media, con una disposición circular.

Haycraft y Krehl<sup>8</sup> describieron dos ejes del corazón en un intento de relacionar la dirección fibrilar con las consecuencias funcionales: uno fijado por adherencias mediastinales y otro apical, que es activo en virtud del hecho de que las fibras longitudinales de los músculos superficiales que llegan hasta el orificio auriculoventricular no causan acortamiento del septum desde el ápex a la base sino que al contraerse fijan el ápex evitando su distensión y ruptura. El hecho de que los sectores exteriores de los músculos superficiales sean oblicuos hace que no causen acortamiento del ápex a la base sino una cierta rotación del primero. La punta del ventrículo se reduce a la presencia de sólo dos capas. Ya en el siglo XX, en la década del 50 y comienzos de la del 70, Torrent Guasp<sup>9,10</sup> y Streeter,<sup>11</sup> respectivamente, propusieron algunos modelos funcionales normales, sobre una estructura estática idealizada, confeccionada teniendo en cuenta la principal configuración y disposición fibrilar del miocardio en su aspecto

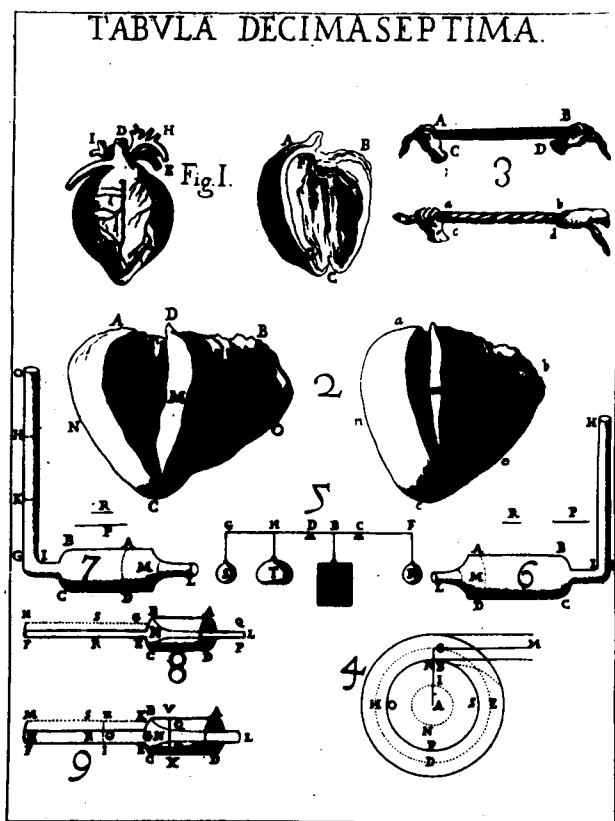


Fig. 1



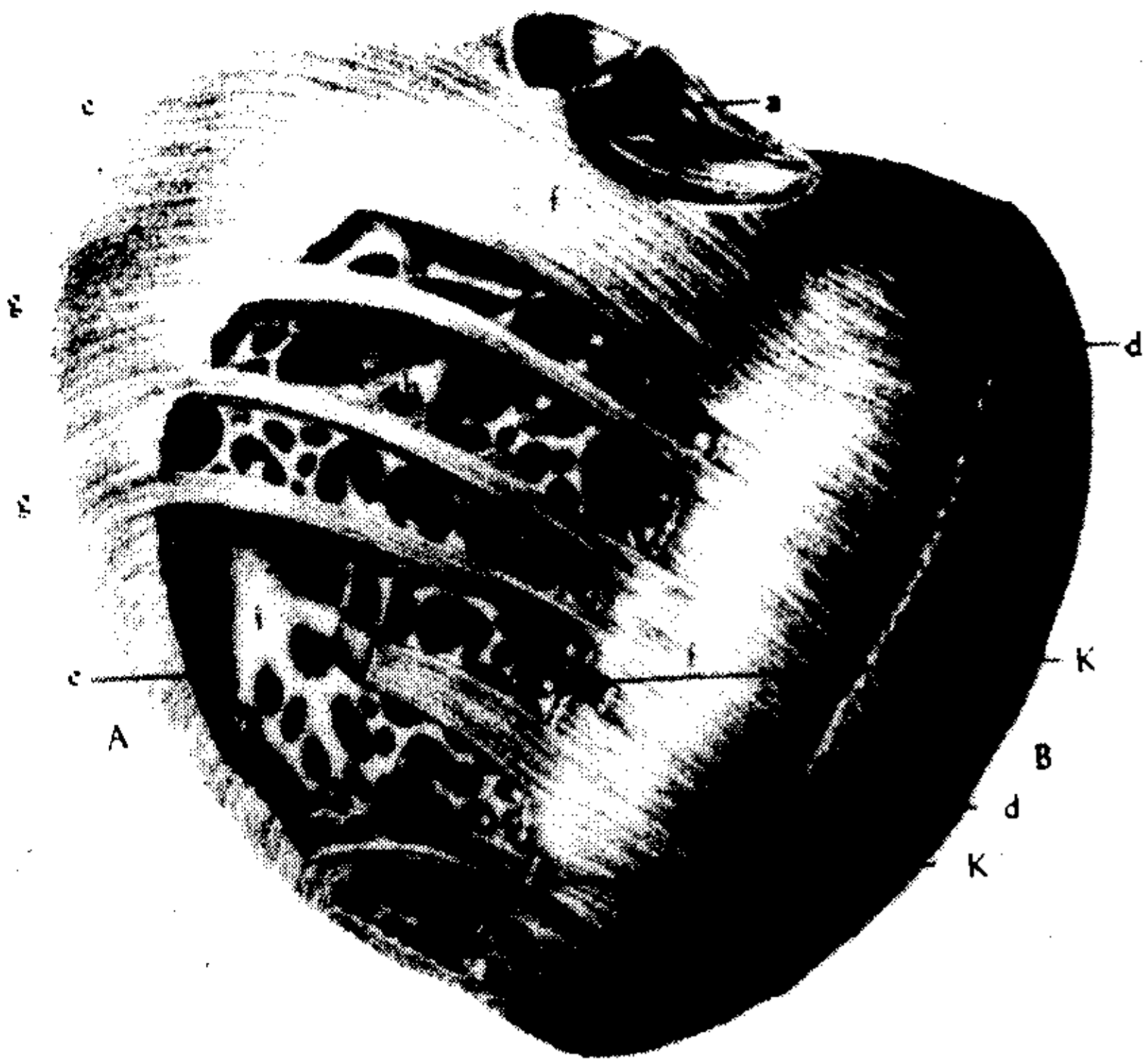


Fig. 2A



Fig. 2B

macroscópico (Fig. 3, A y B).

En el caso de Torrent Guasp la esquematización fue precedida por minuciosas disecciones en las que empleó ingeniosas técnicas. Homologó lo hallado con modelos de plegados, cuerdas, etc. Sus trabajos permitieron la adquisición de algunos conceptos fundamentales:

- a) Pudo demostrar la disposición fibrilar

miocárdica con un primer bucle en la base y otro en el ápex, configurando un 8.

b) Asemejó el montaje o *lay out* del dispositivo muscular del corazón al del músculo orbicular de los párpados. Con esto señaló la carencia de puntos de apoyo para la contracción.

c) Sostuvo que el esqueleto fibroso del corazón no constituye el punto de apoyo o inser-

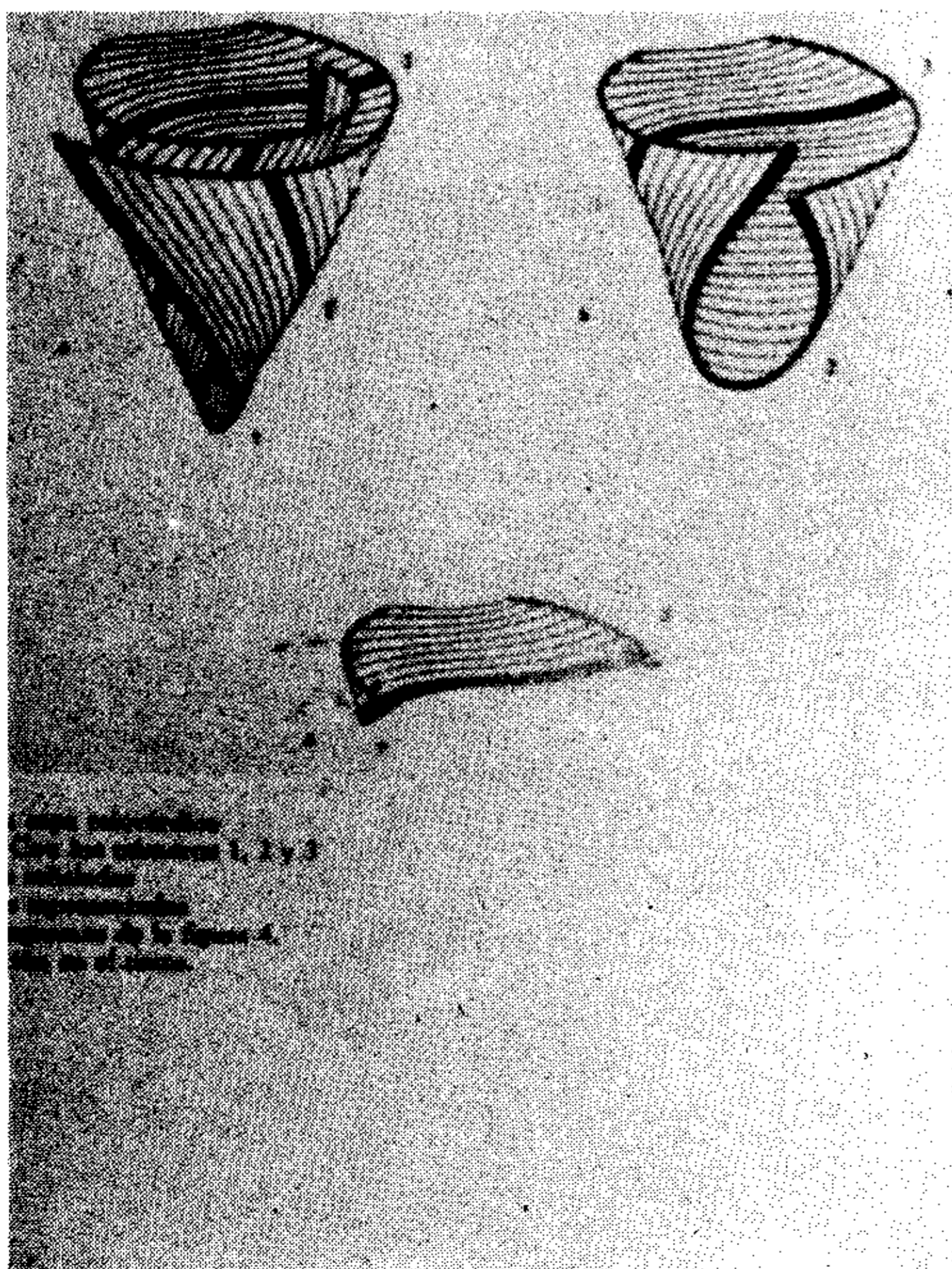


Fig. 3A

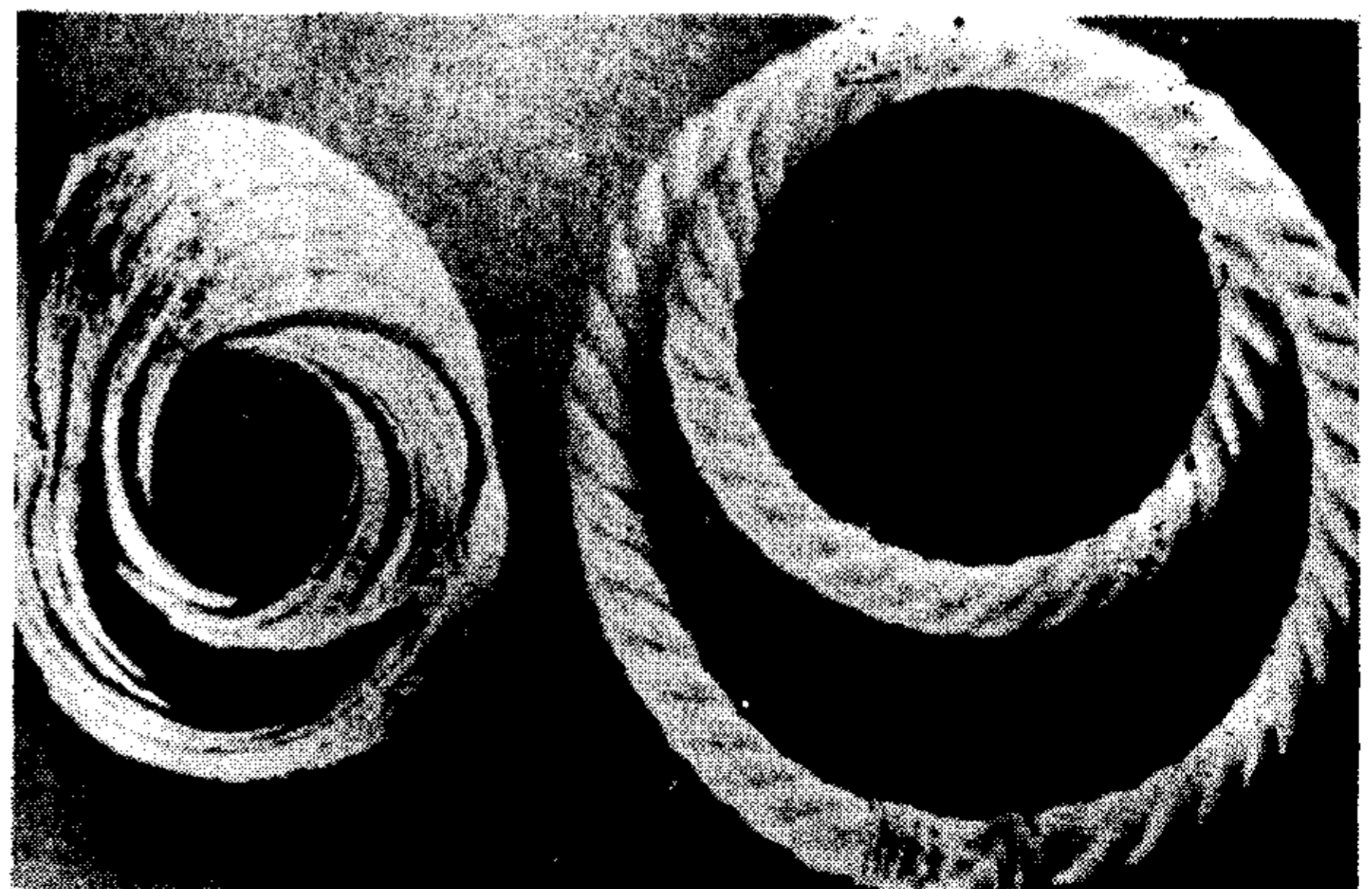


Fig. 3B



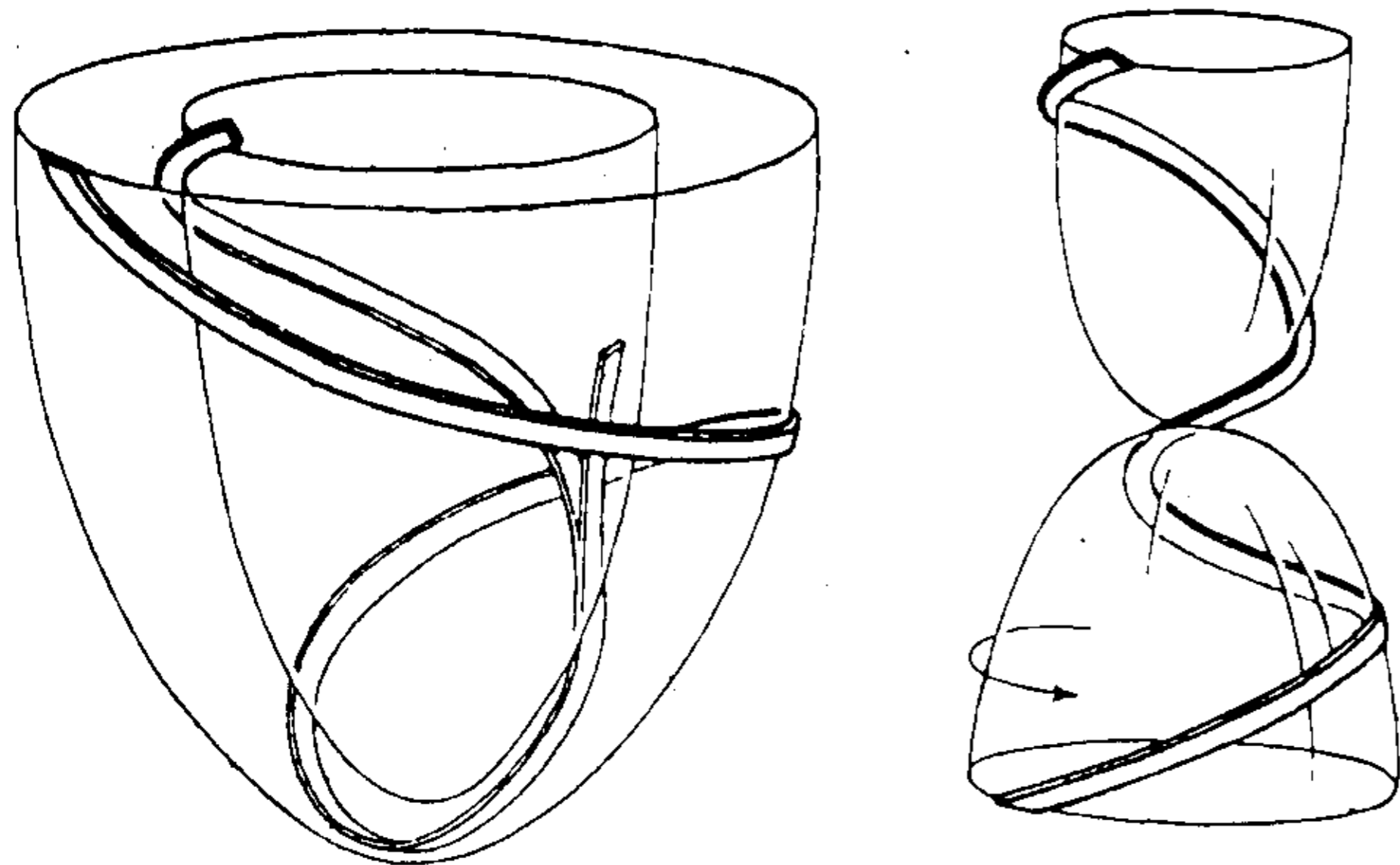


Fig. 4A

ción de las fibras miocárdicas durante el desarrollo de su actividad, como hacían suponer entre los autores modernos los trabajos de Robb y Robb<sup>12</sup> acerca de la inserción de los músculos en el anillo fibroso de la base del corazón.

La sustancial morfología circular de la disposición adoptada por las fibras, expresada por las dos lazadas en 8, sugiere, al igual que con cualquier fibra esfinteriana o las circulares del tubo digestivo o vasos sanguíneos, que el punto de apoyo de los haces miocárdicos se halla constituido en este caso por la sangre. Se habla entonces en términos de "hemoesqueleto" y no de esqueleto fibroso. Las investigaciones de Torrent Guasp constituyen, en esta evolución de conocimientos, una etapa obligada previa antes de los trabajos de Grant, ya que luego de las notables disecciones que efectuó del corazón se pudo comenzar a comprender mejor la complejidad de los trayectos de las fibras miocárdicas. A partir de las observaciones macroscópicas de este autor se insinuó lo que luego Grant y otros autores desarrollaron en la década del 60. Estos trabajos revolucionaron en gran medida lo que hasta ese momento se conocía y aceptaba sin variantes sobre la anatomía de los helicoides fibrilares cardíacos. Estos conceptos prácticamente no se habían modificado desde Lower.

Grant<sup>13</sup> demostró la imposibilidad de la disección y aislamiento individualizadores de los diversos fascículos espirales, como se los describía clásicamente, ya que sus torsiones sobre sí mismos y conexiones diversas con los vecinos ubicados en otras posiciones del plano hacen imposible seguir sus recorridos con la idea simplista de encontrarles un principio y fin y aislarlos en forma individual\* (Fig. 4A).

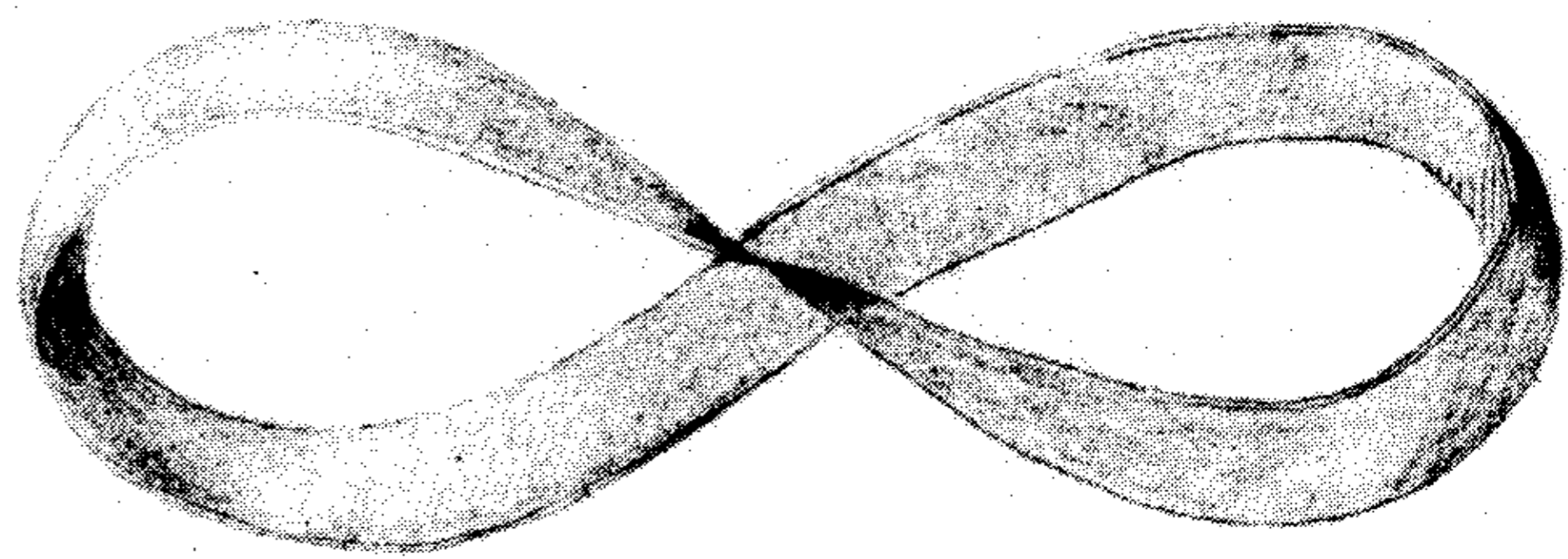


Fig. 4B

La complejidad de esa disposición fibrilar proviene de los primeros períodos del desarrollo, en que una fisión binaria de las fibras se efectúa con ángulos muy agudos, lo que genera confusión y dificultades insalvables para individualizar la fibra madre de las hijas.<sup>14</sup>

A la luz de lo anterior se puede equiparar legítimamente la disposición de los helicoides cardíacos con la noción de infinito que en sus torsiones genera una cinta de Möbius (Fig. 4B). Del mismo modo surge con claridad que la geometría euclidiana no constituye una herramienta adecuada para esquematizar algunos aspectos estructurales. Existen, por el contrario, vinculaciones con la topología o geometría de cuerpos flexibles.

Grant demostró también la variabilidad frecuente en la configuración fibrilar de las diversas capas ventriculares, no entre sí, sino en conjunto, en relación con las diversas regiones vecinas de la pared. Con este objeto elaboró un esquema por demás demostrativo (Fig. 5A). Esto se correlaciona notablemente con un mapa de líneas isocrónicas que representan la contractilidad ventricular en función del tiempo,<sup>15, 16</sup> y fue efectuado por otros autores mucho tiempo después del esquema elaborado por Grant (Figs. 5B y 5C).

De lo anterior surge que la sumatoria de contractilidades regionales del ventrículo generaría un vector giratorio resultante, en dirección centrípeta hacia el centroide de la cavidad ventricular; no obstante, los vectores parciales varían notablemente entre sí en sus direcciones durante sus recorridos por la pared miocárdica.

Lo analizado hasta ahora demuestra la imposibilidad de esbozar un esquema totalizador de la estructura parietal cardíaca en su conjunto. Parecería entonces imposible el diseño de un modelo para la contractilidad parietal, y si bien

\* Schärer R: Observaciones no publicadas.

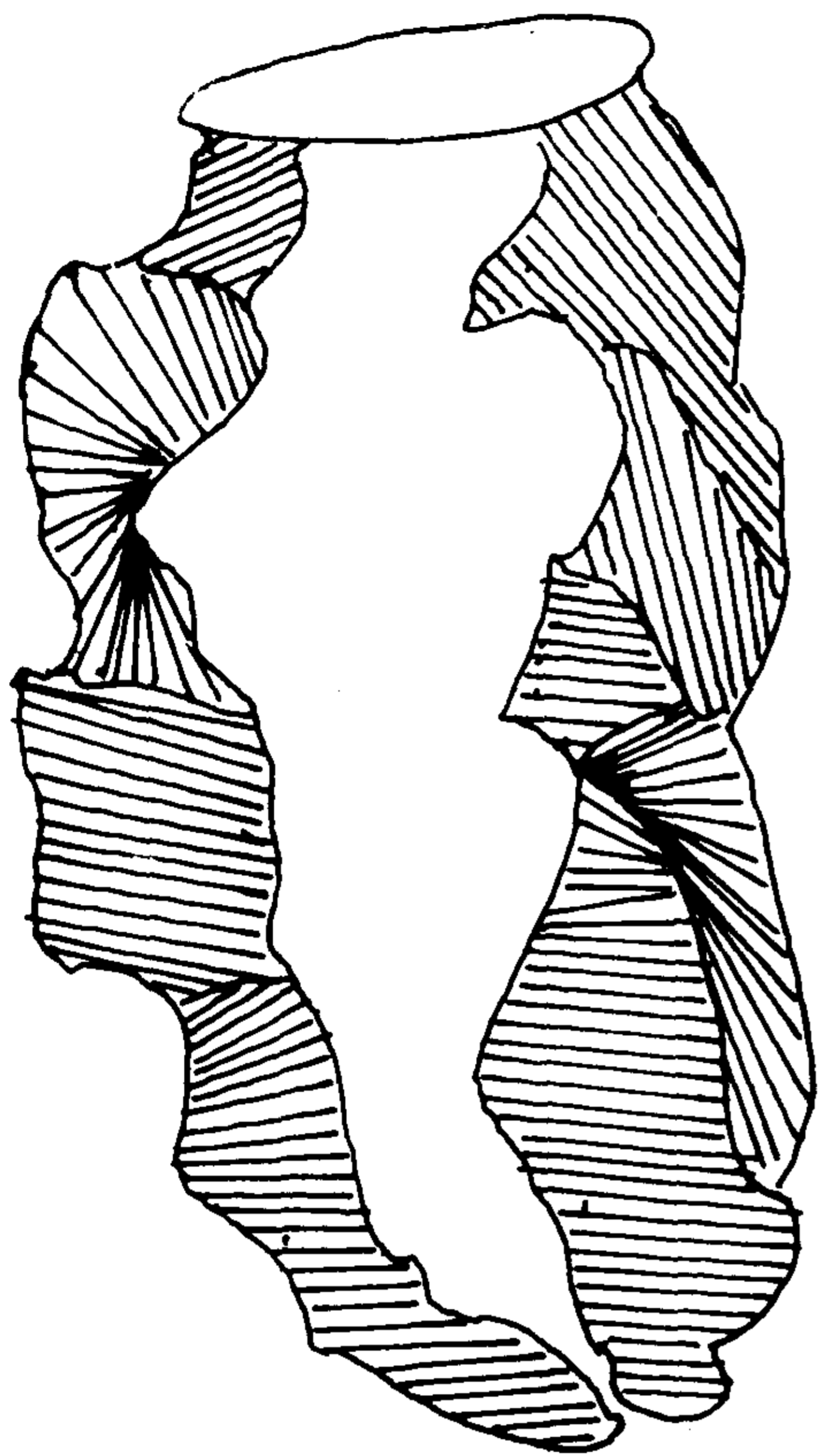


Fig. 5A

esto es así tomado con un criterio holístico, no lo es si se consideran para ese fin sectores limitados de la pared miocárdica, sin llegar a extensiones importantes de la misma, tanto en lo referente a superficie y volumen como a significado funcional. Es posible entonces considerar la estructura fibrilar de un sector limitado de la pared para intentar reproducir algunos fenómenos que pueden tener una relación íntima con los componentes de esa estructura y con las variaciones y relaciones cambiantes de esos componentes con los movimientos cíclicos de la contractilidad.

Lo que no será entonces totalmente válido en el sentido de exactitud anatómica o estructural con criterio totalizador, lo será desde la vertiente aproximativa de una simulación funcional, lo que permitirá la aplicación físico-matemática para el estudio de ciertos fenómenos estructurales durante los movimientos cíclicos del miocardio.

Una de las mayores trabas evolutivas que quizás han existido hasta ahora para el estudio de la pared ventricular y de muchas entidades patológicas vinculadas íntimamente con la estructura y función de ésta, ha sido la dificultad de diseñar modelos adecuados que toman en cuenta la estructura parietal básica y su relación con las variaciones dinámicas de ésta. Es oportuno señalar que la sola mención de "pared" produce una asociación espontánea inconsciente con una estructura estática o poco móvil y básicamente de configuración simple.

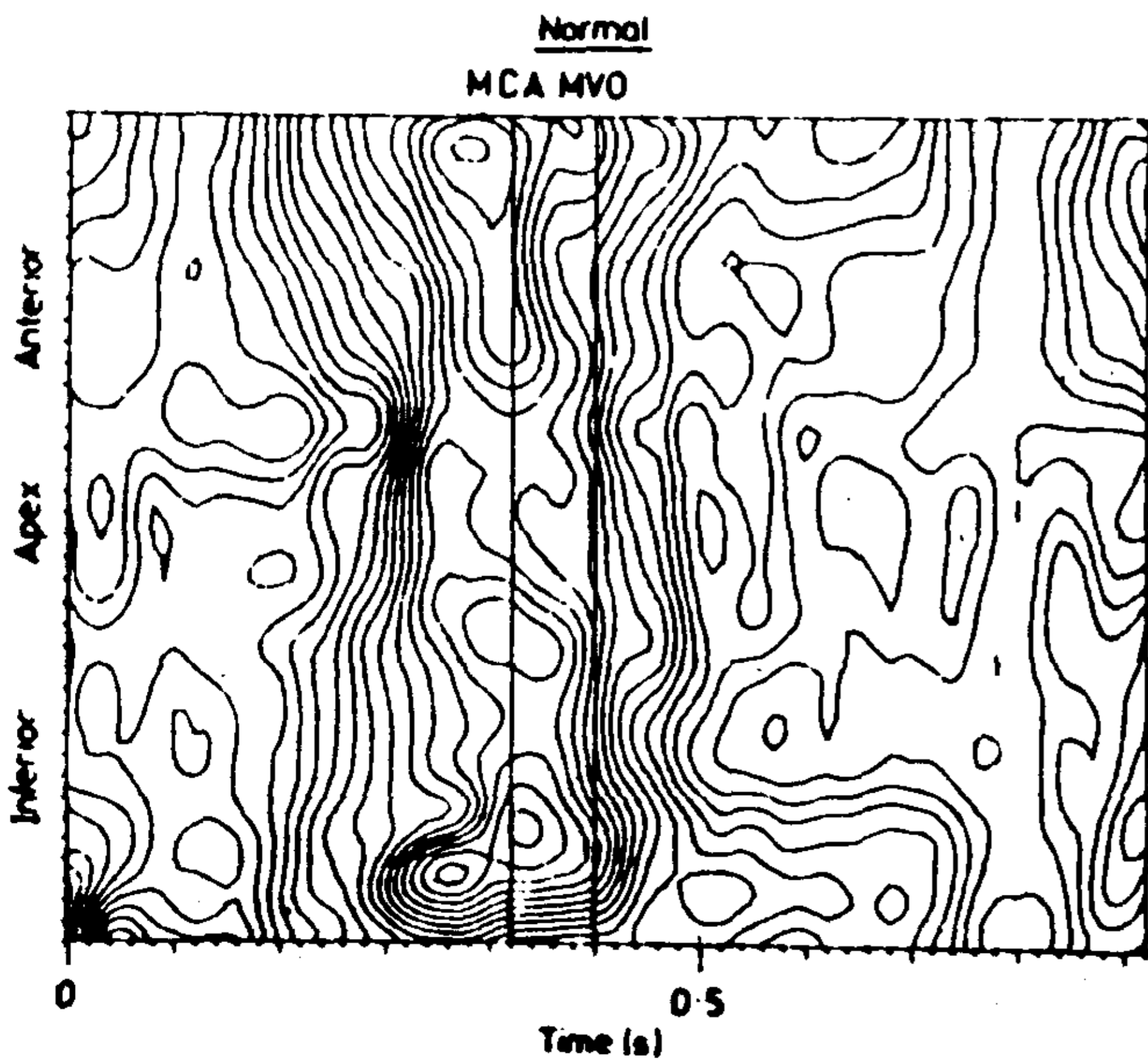


Fig. 5B

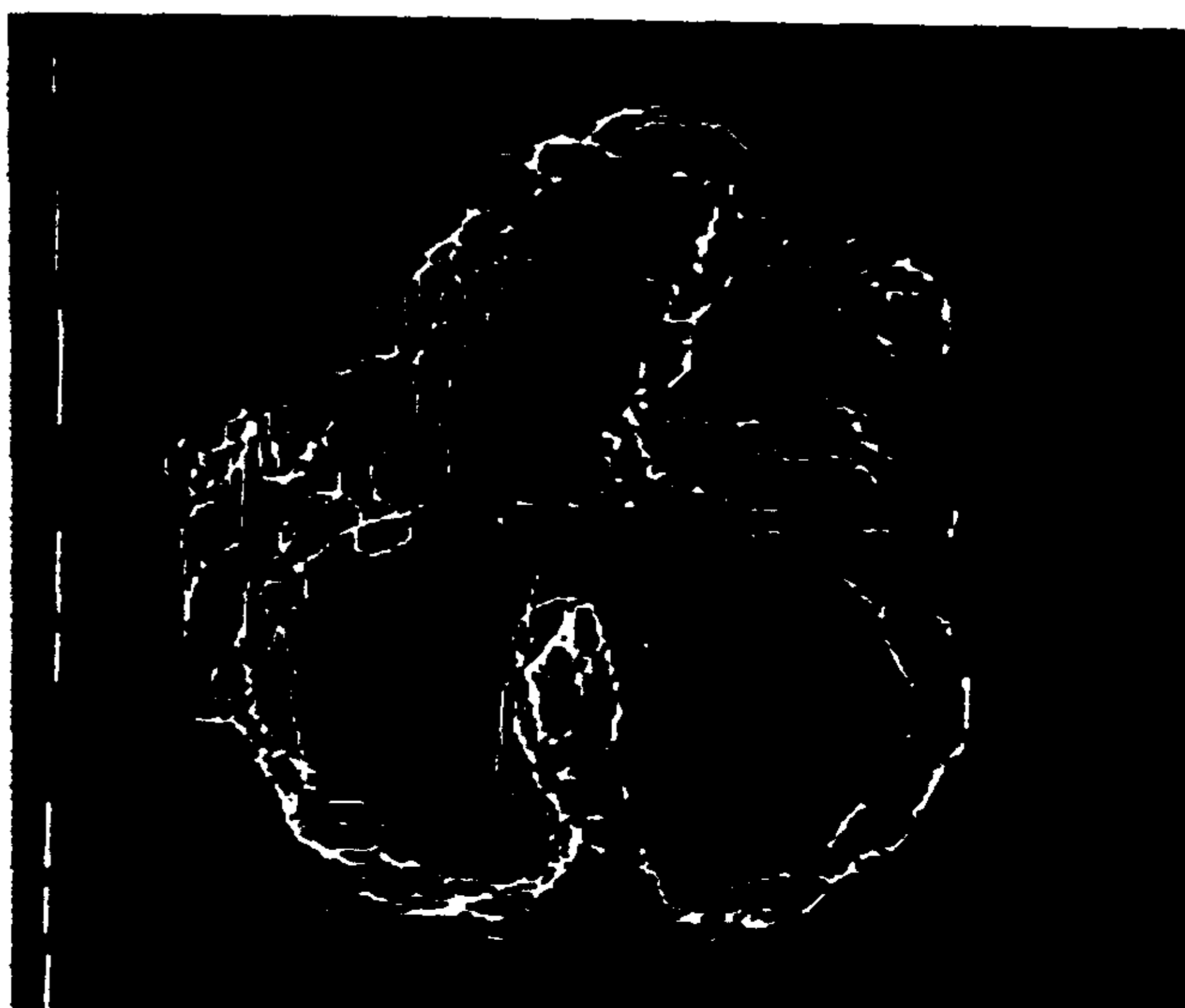


Fig. 5C



Asimismo, imaginar su función desde el punto de vista funcional se encuentra simplificado al observar, en los ya rutinarios estudios cruentos e incruentos de contractilidad, cómo la variación en más o en menos de uno de los diámetros de la pared ventricular es registrada como un adelgazamiento y engrosamiento cíclicos con sus variantes anormales. Estos cambios son apreciables visualmente pero susceptibles de ser medidos con precisión para los cálculos de trabajo y eficiencia ventriculares. Esta simplificación es útil para cuantificar las funciones mencionadas pero es inapropiada para la reproducción y comprensión de ciertos fenómenos estructurales íntimamente vinculados con la disposición de los componentes relacionados de la estructura y con sus movimientos solidarios.

La estructura parietal miocárdica posee un factor anexo que le agrega complejidad a lo expuesto y que seguramente en el futuro deberá ser incluido y estudiado sistemáticamente; nos referimos al terminal arterial coronario, es decir, la particular estructura de la red capilar coronaria intramiocárdica. Se trata de una estructura sumamente especial que mantiene relaciones particulares estáticas y dinámicas

con las fibras de la pared ventricular. Desde el punto de vista estático ha sido posible registrar las lesiones de esta estructura en la cardiopatía chagásica crónica.<sup>17, 18</sup> En el aspecto dinámico funcional la miocardiopatía hipertrófica primaria produce en general no sólo obstrucción al pasaje del flujo ventricular sino que la contractilidad alterada por la falla básica estructural genera isquemia con indemnidad de los vasos coronarios tronculares epicárdicos. Este ejemplo no es nada más que una muestra indirecta sobre la vinculación profunda entre circulación coronaria intramiocárdica, estructura parietal y contractilidad.

Se hace entonces necesario el diseño de un modelo funcional que tome en cuenta la estructura parietal normal y su dinámica en relación con la particular disposición capilar intramiocárdica que hoy se conoce con absoluta precisión luego de los trabajos de Jörg,<sup>17</sup> Factor<sup>19</sup> y otros (Figs. 6A y 6B).

Es todavía un hecho que los vasos parietales intramiocárdicos no constituyen un estudio obligado de rutina en la cardiopatía isquémica.

Deberá considerarse también, en el esquema estructural de la pared ventricular, la particular disposición fibrilar y espesor de la punta ven-

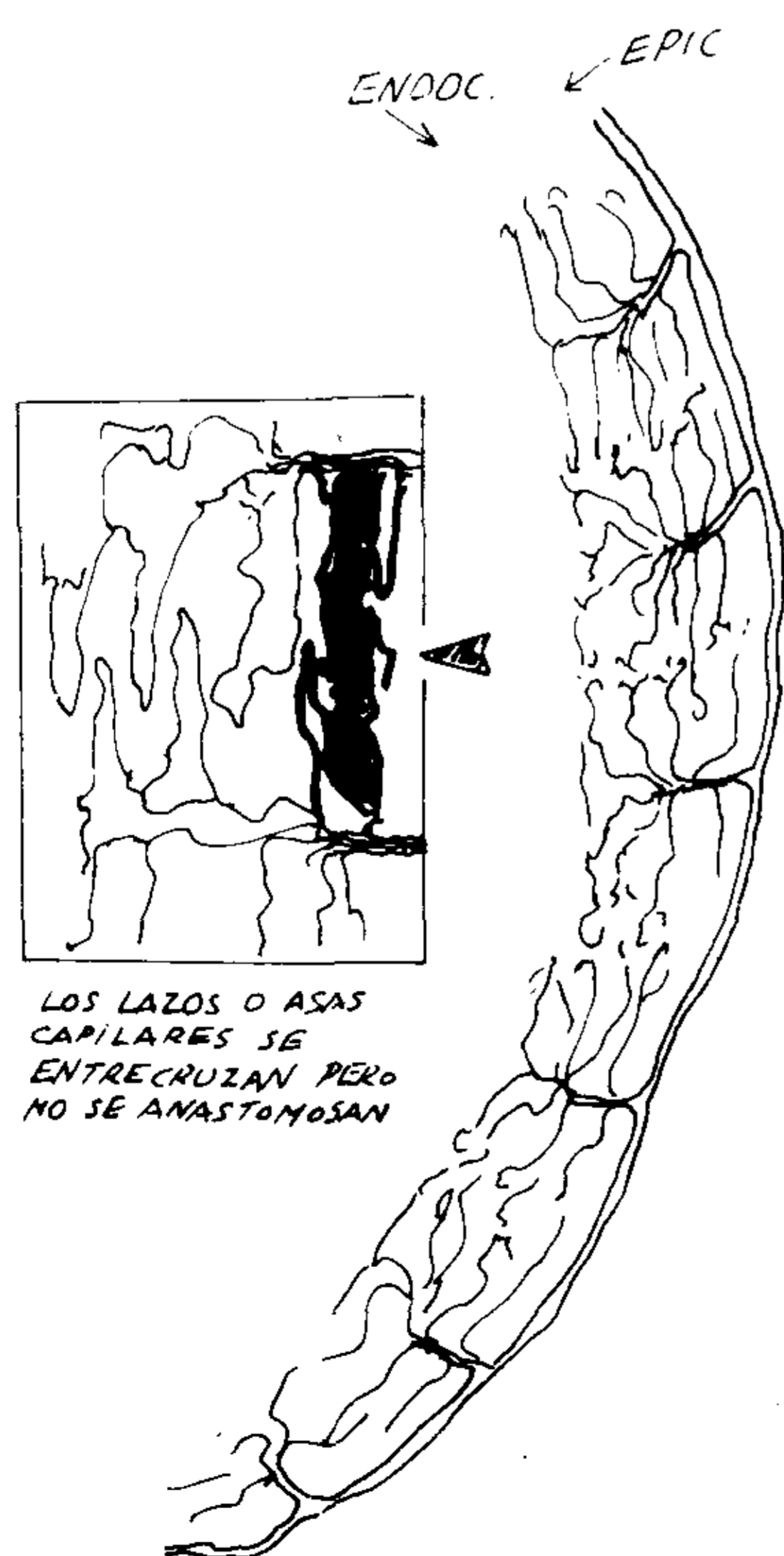


Fig. 6A



Fig. 6B

tricular. Las diferencias entre la punta y otras regiones de la pared ventricular no se deben solamente a causas estructurales sino también a características funcionales y metabólicas. Todo aquello significa que la punta del corazón es una zona de vulnerabilidad mayor y asiento frecuente de patologías con alta incidencia en esa región, tal el caso del aneurisma de ventrículo, cualesquiera que fueren sus etiologías.

Borelli, ya en el siglo XVIII, afirmó que las diferencias entre el movimiento físico y biológico no invalidaban el método científico que podía aplicarse al último, aunque supo que no siempre se pueden estudiar los fenómenos fisiológicos en forma directa, específicamente la dinámica del corazón, ya que al poseer una estructura y función diferentes de la del aparato locomotor no podría aplicarse el sencillo método de una cuerda con un peso en un extremo u otros ejemplos de análoga sencillez. Debido a lo anterior, para afrontar el estudio de la *vis motiva musculi cordis*, Borelli expuso claramente la necesidad de los *modelados*, los que según Bunge son la proyección de modelos conceptuales y la simulación de cambios imaginarios. Es evidente que el nivel de generalización obtenido con los modelados sería mucho mayor que los empíricos del conocimiento ordinario obtenidos por evidencia directa.<sup>20, 21</sup>

Los modelos y modelados que empleemos deberán tomar en cuenta la imposibilidad real de representar a esa estructura, ya sea en su aspecto

estático y también en lo referente a su dinámica en tres dimensiones. Esa imposibilidad parcial o total proviene, como hemos visto, de la extrema variabilidad de esa estructura y también, por ciertos hechos que aún se ignoran, desde el punto de vista de las uniones interfibrilares, del intersticio y de la embriología normal y anormal del miocardio.

Presentaremos una aproximación a modelos posibles diseñados según algunas de las características estructurales conocidas del miocardio con su proyección dinámica. El objetivo es tratar de imitar y observar algunas posibles interrelaciones recíprocas de las partes constitutivas.

Analizaremos también las posibilidades de empleo de recursos de algunas ramas actuales de la Matemática: las transformaciones afines, la Geometría Combinatoria, la Geometría Diferencial y la Topología. En conexión con estas disciplinas, y como herramienta descriptiva de los fenómenos observados, resulta de gran utilidad la simulación y animación computadas.<sup>22-30</sup>

La estructura fibrilar miocárdica varía de región en región. Es necesario entonces formular modelos esquemáticos que simplifiquen esta enorme complejidad y nos permitan avanzar en nuestra comprensión de esta realidad. La experimentación y verificación fáctica de los resultados teóricos permitirán la corrección y el perfeccionamiento de dichos modelos.