2
Revisão bibliográfica

2.1.
Definição de aneurismas

Aneurisma é uma dilatação localizada e irreversível de um vaso arterial. Podemos definir como aneurisma, quando o segmento de um vaso tem seu diâmetro normal presumido, para a idade e altura do paciente, aumentado de 50%. Na figura 2.1 podemos observar um caso real de um vaso sanguíneo portador de aneurisma cerebral.

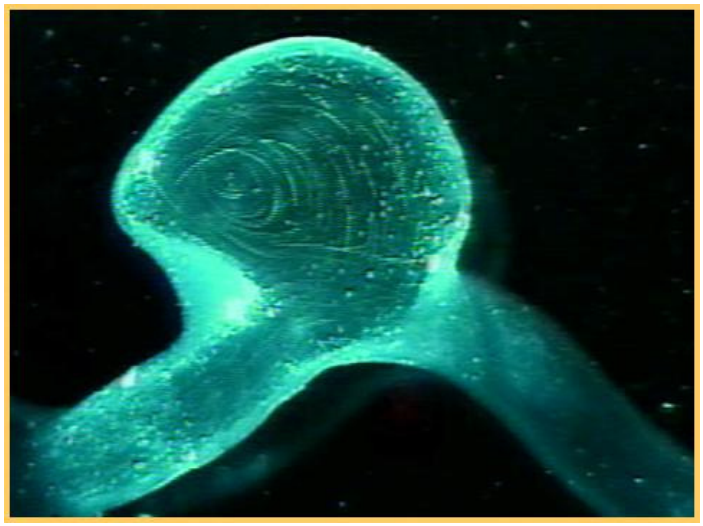

Figura 2.1 – Exemplo de dilatação permanente e localizada – Disponível em: http://www.gforum.tv/board/1092/285283/um-importante-avanco-no-entendimento-dos-aneurismas-cerebrais.html - Acessado em: 21/09/2010

A dilatação da parede arterial pode ocorrer de várias formas, algumas estão descritas abaixo:

- Arteriomegalia é uma dilatação difusa (não localizada) envolvendo vários segmentos da artéria com aumento do diâmetro em mais de 50% do seu diâmetro normal presumido.
- Ectasia é caracterizada por dilatação da artéria menor que 50% do seu diâmetro normal presumido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

- Pseudoaneurisma ou falso aneurisma é a lesão de pelo menos uma das camadas de um vaso, sendo contido por um hematoma pulsátil, ou também quando apresenta lesão das camadas intima e media, preservando-se a adventitia (essas camadas serão definidas no item 3.6).
- Aneurisma infeccioso (micótico) é uma dilatação segmentar sacular do vaso devido à infecção bacteriana, freqüentemente por embolo séptico.

2.2. Tipos de aneurismas

Os aneurismas são divididos em dois tipos:

A) Aneurismas que provocam uma dilatação pura da parede arterial. A expansão pode ser fatal se o tecido arterial sofrer ruptura. Na figura 2.2 podemos observar esquematicamente este caso.

Figura 2.2 - Representação da ruptura do aneurisma - John A. Elefteriades (2006)

B) Aneurismas causados por dissecção. A dissecção (separação das camadas internas e externas da parede do vaso) ocorre quando o sangue vasa para o meio da parede através de uma laceração no seu revestimento interno. Na dissecção da aorta, o sangue penetra na *íntima* e entra na camada *média*. A alta pressão rasga os tecidos da camada *média*, permitindo que mais sangue entre no espaço criado. Isso pode se propagar ao longo do comprimento da aorta por uma distância variável, dissecando em direção ou na direção contraria ao coração, ou em ambas as direções. O rasgão

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

inicial geralmente está a 100 mm da válvula aórtica (ou valva aórtica, separa o ventrículo esquerdo do coração da artéria aorta). O risco da dissecção da aorta é de que a aorta possa romper, levando a uma perda massiva de sangue, resultando na morte o paciente. Na figura 2.3 podemos observar esquematicamente este caso.

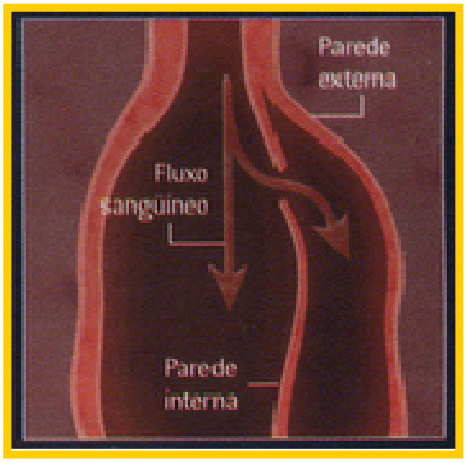

Figura 2.3 - Representação da dissecção dos aneurismas - John A. Elefteriades (2006)

A dissecção aguda da aorta, também chamada de aneurisma dissecante da aorta, é uma condição freqüentemente fatal. O enfraquecimento da parede arterial é responsável pela maior parte dos casos de dissecção aórtica aguda.

A causa mais comum dessa deterioração é a hipertensão arterial, a qual está presente em mais de dois terços dos pacientes que apresentam dissecção da aorta. As outras causas incluem os distúrbios hereditários do tecido conjuntivo (tecido encontrado da parede da aorta e outros vasos), especialmente as síndromes de Marfan e de Ehlers-Danlos, defeitos congênitos do coração e dos vasos sangüíneos como a coarctação da aorta (malformação mais freqüente da aorta) da aorta, persistência do canal arterial e a válvula aórtica bicúspide, aterosclerose (formação de placas de gordura na parede da aorta) e lesões traumáticas. Teoricamente, qualquer indivíduo que apresenta uma dissecção aórtica aguda sente dor, a qual geralmente é de forte intensidade e de início súbito. Em geral, os pacientes sentem uma dor torácica, geralmente descrita como "dilacerante". Também é freqüente a dor na região dorsal (parte posterior do tórax), entre as escápulas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

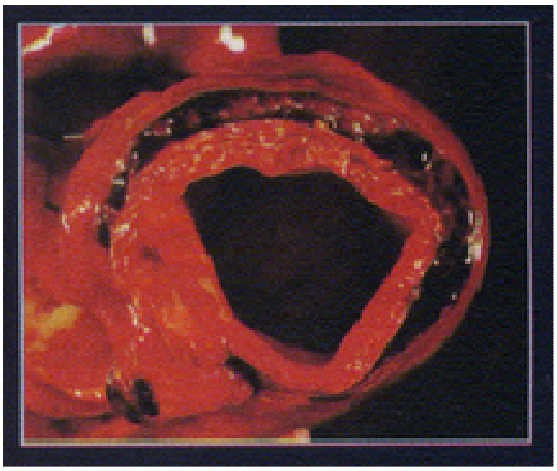

Figura 2.4 - Corte transversal do aneurisma de dissecção - John A. Elefteriades (2006)

2.3. Prevalência

Dos aneurismas da aorta, 80% estão situados abaixo das artérias renais, como nos mostra esquematicamente a figura 2.5.

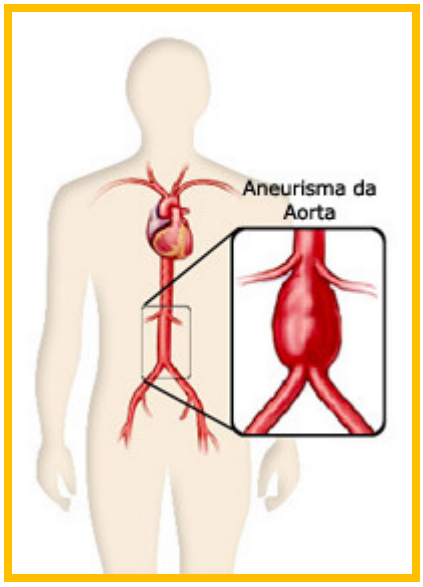

Figura 2.5 - Local da maior incidência dos aneurismas – Disponível em: http://copy.pnn.pt/noticias_imagens/aneurisma_aorta.jpg - Acessado em: 21/09/2010

O aneurisma de aorta abdominal (AAA) é uma dilatação localizada na aorta infra-renal. A ruptura do aneurisma de aorta abdominal é a 13ª maior causa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

de morte nos EUA. Segundo os pesquisadores Raghavan, Marshall Webster e David Vorp (1996) de 3% a 5% da população mundial sofre de aneurisma da aorta abdominal (AAA).

Na figura 2.6 podemos observar uma imagem computadorizada de um aneurisma de aorta abdominal. Com a mesma imagem é possível visualizar a aorta e sua disposição no corpo humano, assim como algumas de suas ramificações.

Figura 2.6 - Exemplo de aneurisma na aorta abdominal – Disponível em: http://www.hospiten.es/hospiten/HOSPITEN/published/DEFAULT/CMI/DTE/aaa/aneurisma0007.jpg - Acessado em: 21/10/2010

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.4. Aorta

A aorta é um órgão complexo com múltiplas funções e o maior condutor vascular de nosso corpo. Ela recebe todo o sangue ejetado do ventrículo esquerdo do coração, distribuindo-o para todo o corpo, com exceção dos dois pulmões. A aorta ramifica-se em artérias menores ao longo de seu trajeto, desde o ventrículo esquerdo até a parte inferior do abdômen, ao nível da porção superior do osso do quadril (região pélvica).

A aorta costuma ser um dos primeiros locais a ser acometido pela aterosclerose, doença que pode contribuir para o aparecimento de outras enfermidades, entre elas os aneurismas.

Tradicionalmente, diagnósticos clínicos de doenças da aorta são baseados na dilatação da aorta, formação de aneurismas, calcificação ou dissecção. No entanto, segundo Boudoulas e Wooleym (2002), desenvolvimentos em imagens cardiovasculares, medições das propriedades elásticas da aorta e o entendimento da biologia vascular em nível molecular tem proporcionado as novas bases para renovar os conhecimentos das funções da aorta no estado saudável e doente.

Apesar de a aorta operar a maior parte do tempo sob pressão fisiológica, em alguns momentos a aorta trabalha sob pressões muito baixas ou muito altas. Todos estes estados necessitam de um modelo das propriedades mecânicas da aorta para obtermos um espectro de tensão confiável.

O diâmetro máximo observado no aneurisma é o principal critério para determinação da necessidade da cirurgia reparadora. Esse é o único critério usado, porem às vezes um aneurisma de aorta abdominal grande não rompe e um pequeno rompe. Claramente este não é um critério eficaz.

Dados sobre a espessura e as propriedades de colapso do tecido da aorta abdominal podem fornecer informações sobre o processo de ruptura do aneurisma. Observa-se na figura 2.7 uma grande redução da espessura ao redor do local de ruptura.

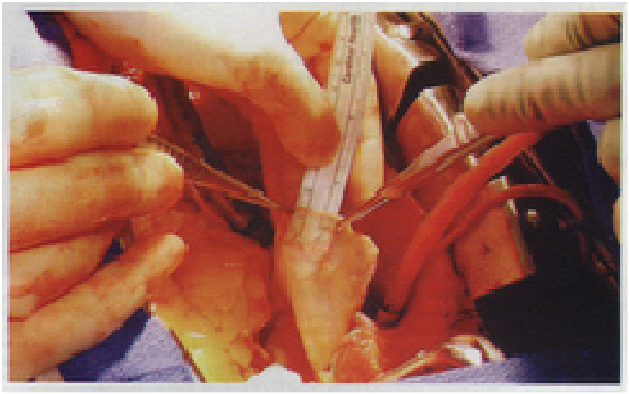

Figura 2.7 - Espessura da parede arterial após a formação do aneurisma - John A. Elefteriades (2006)

Em estudo realizado pelo pesquisador Madhavan L. Raghavan e outros (2006) em uma artéria que rompeu em função de crescimento excessivo do aneurisma, podemos observar a variação da espessura da parede arterial e verificar uma grande redução da mesma na região onde ocorreu a ruptura. Podemos perceber que em regiões relativamente próximas observam-se espessuras bem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

maiores que a do local de ruptura do aneurisma. A figura 2.8 representa o caso estudado pelo autor supracitado.

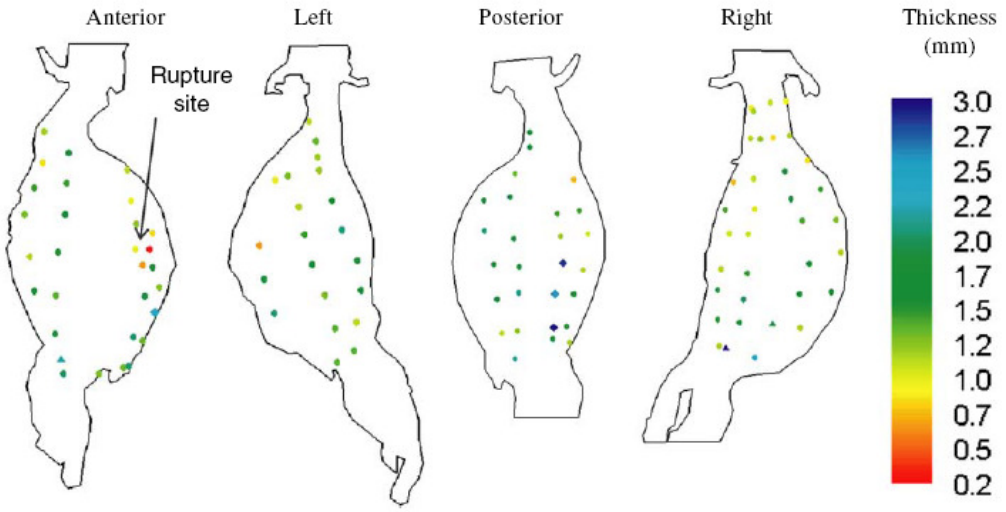

Figura 2.8 – Variação da espessura da parede arterial no local de ruptura do aneurisma - Madhavan L. Raghavan e outros (2006)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.5. Divisão da artéria aorta

Na figura 2.9 podemos observar a disposição da aorta e dos principais órgãos do corpo humano.

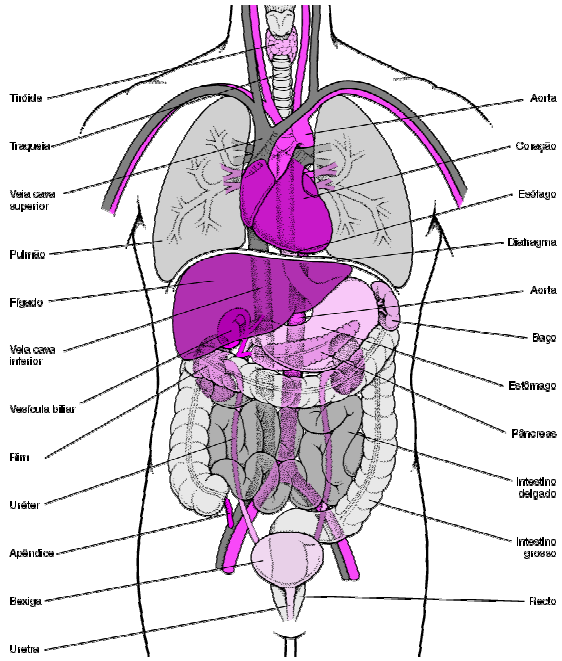

Figura 2.9 - Representação da aorta e dos principais órgãos do corpo humano – Disponível em: http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_140.gif - Acessado em: 21/10/2010

Para que ocorresse uma melhor comunicação entre os pesquisadores à aorta foi segmentada em quatro trechos como podemos observar no esquema abaixo.

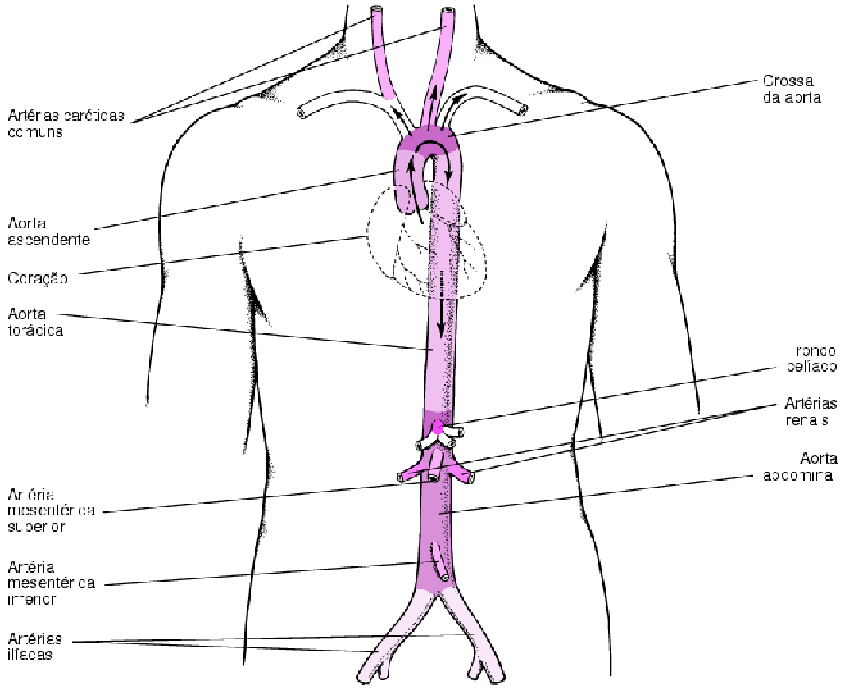

Figura 2.10 - Representação da aorta segmentada – Disponível em: http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_141.gif - Acessado em: 21/10/2010

Os quatro trechos da aorta são assim divididos:

- Aorta ascendente: porção que sai do coração e encaminhasse em direção a cabeça.
- Crossa da aorta: também chamada de arco da aorta, é a porção compreendida entre a aorta ascendente e a aorta torácica, esta porção muda a direção da aorta, fazendo com que esta se dirija para as pernas do ser humano.
- Aorta torácica: é a porção localizada no tórax, termina na porção onde surge o tronco celíaco.
- Aorta abdominal: porção localizada no abdome, nesta região localiza-se a maior parte dos aneurismas, esta porção estende-se até a ramificação das artérias ilíacas, ramificação esta que levará sangue aos membros inferiores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.6.
Camadas da parede arterial

Pelas observações realizadas sobre o tecido biológico concluímos que este é composto por elastina (que apresenta resistência muito baixa) e por colágeno (que apresenta resistência bem maior). Assim como todas as outras artérias, a aorta é composta por três camadas. A camada que está em contato direto com o fluxo sanguíneo é a *túnica íntima*, geralmente chamada de *íntima*. Esta camada é composta principalmente de células endoteliais e pode-se dizer que ela é quase desprezível nos adultos saldáveis, pois apresenta uma espessura muito pequena e baixa resistência mecânica, tem como objetivo principal o auxílio da condutividade do sangue. Logo abaixo desta camada está a *túnica média*, conhecida como *média*. Esta "camada média" é composta por células musculares lisas e por tecido elástico e é a maior responsável pela resistência mecânica da aorta. A camada mais externa (mais distante do fluxo sanguíneo) é conhecida como *túnica adventícea* ou *adventícea*. Esta camada é composta de tecido conjuntivo, que tem como principal função a manutenção da forma e a proteção da camada media.

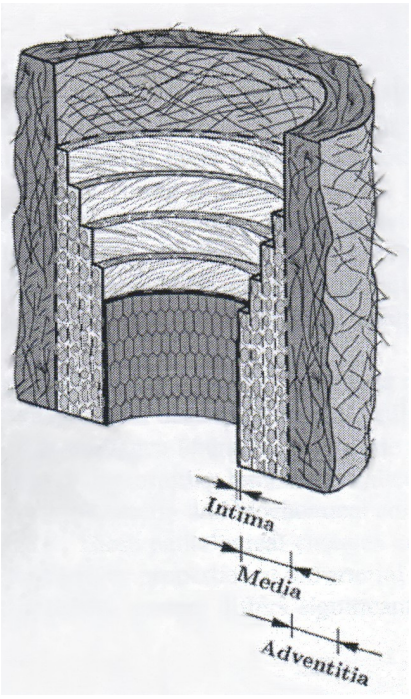

Figura 2.11 - Camadas constituintes da aorta – Gerhard A. Holzapfel (2000)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.7.
Etiopatogenia

O aneurisma de aorta abdominal é causado por um processo degenerativo não específico (comumente considerado aterosclerótico) em 95% dos doentes; raramente são de outras etiologias como: trauma, sífilis, inflamatório, micótico e Síndrome de Marfan.

A maioria dos aneurismas ateroscleróticos incide entre a sexta e a sétima década de vida.

Por muitos anos foi considerado que o aneurisma de aorta abdominal fosse o resultado do processo degenerativo aterosclerótico na aorta humana. Tanto o aneurisma quanto a aterosclerose, ambos aumentaram suas prevalências no ancião, esta suposição foi aceita prontamente pela maioria dos médicos. Porém, evidências clinicas e bioquímicas compilaram na última década causas diferentes e sugerem que fatores hereditários e mudanças bioquímicas podem representar um papel dominante na etiologia de aneurisma de aorta abdominal na maioria dos doentes (estes estudos ainda não são conclusivos).

Múltiplas investigações genéticas de aneurisma da aorta sugerem que possa ser uma doença familiar.

Pesquisas recentes têm demonstrado que as mudanças estruturais da parede da aorta podem ser decorrentes da degradação por enzimas.

Atualmente, sem meios identificáveis disponíveis para inverter as anormalidades genéticas e bioquímicas associadas com o desenvolvimento dos aneurismas, não se pode prevenir com medicamentos a degeneração da parede da aorta e nem a eventual ruptura. O único tratamento efetivo atualmente conhecido para prevenir ruptura do aneurisma da aorta é a interposição na artéria aneurismática de prótese artificial na maioria dos casos, sendo que a prótese biológica é usada nos casos de infecção.

Na figura 2.12 apresentamos esquematicamente os tipos de próteses utilizadas na reparação dos diferentes aneurismas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

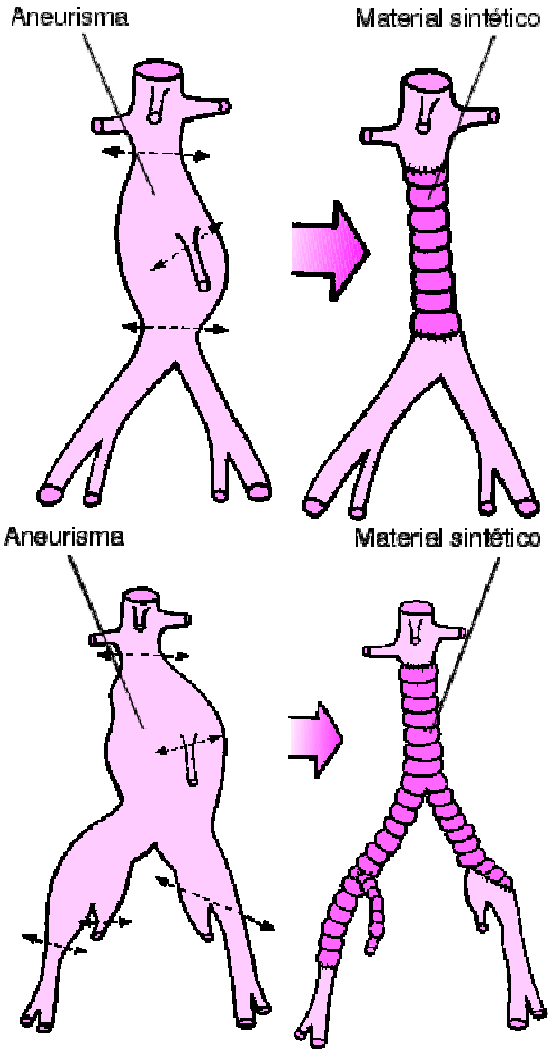

Figura 2.12 - Exemplo de próteses usadas na reparação de aneurismas – Disponível em: http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_142-1.gif - Acessado em: 21/10/2010

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.8. História

Ramos & Corrêa Neto (1935) relataram que o aneurisma de aorta abdominal evoluía de uma maneira progressiva e irrevogável para a morte.

Sabiston Jr (1997) descreveu que o aneurisma de aorta abdominal se não tratado cirurgicamente evolui inexoravelmente para a ruptura.

Law (1998) referiu que o aneurisma de aorta abdominal é responsável por 2% das mortes da população masculina acima de 60 anos no Reino Unido.

Basnyat e outros autores (1994) estimaram que a incidência anual de ruptura do aneurisma de aorta abdominal é de 8 por 100.000 habitantes.

Chosksy, Wilmink, Quick (1999) estimaram que a incidência anual de ruptura do aneurisma de aorta abdominal é de 17,8 por 100.000 habitantes para o sexo masculino e de 3 por 100.000 habitantes do sexo feminino; dando uma proporção de respectivamente 6/1, em relação ao gênero.

2.9. Risco de ruptura e morte

Estes (1950) revisando o cadastro de 102 pacientes com aneurisma de aorta abdominal atendidos na Clinica Mayo, verificou que 97 apresentaram origem aterosclerótica, 4 de sífilis e um de trauma. Constatou-se que a sobrevivência em três anos foi de 50%, em 5 anos de 19% e em 8 anos de 10%. Nenhum dos doentes sobreviveu mais que dez anos. A ruptura foi à causa de morte em 63%.

Nos doentes com aneurisma de aorta abdominal (AAA) a incidência de ruptura é de 30% a 63%. Em 1972 Szilagyi, Elliot e Smith relataram que a sobrevivência de doentes com AAA menor que 6 cm foi de 48% e em maior que 6 cm de diâmetro a sobrevivência foi de apenas 6%. Em 1977 Darling revendo 24.000 necropsias consecutivas, encontrou incidência de morte por ruptura de 25% para aneurisma entre 4 e 7 cm, de 45,6% entre 7 e 10cm, e 60,5% para maiores que 10cm. Porem, nos AAA de 4 cm ou menores a incidência de morte por ruptura foi de 9,5%.

A ruptura do AAA é responsável por 1,4% de todas as mortes em homens acima de 65 anos no Reino Unido, segundo dados divulgados em 1998.

Após a ruptura do AAA, 50% dos pacientes morrem antes de chegarem ao hospital, e da outra metade que chega ao hospital com vida, 30% a 50% morrem devido à cirurgia de emergência.

2.10. Fatores de risco de ruptura

Embora o diâmetro transversal do aneurisma seja aceito como o melhor preditor do risco de ruptura; outros fatores também têm influência, visto que aneurismas pequenos também rompem. Szilagyi (1972) encontrou que a hipertensão diastólica (maior que 100/150 mmHg) estava presente em 67% dos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

doentes com ruptura do AAA, porém, nos doentes sem ruptura a hipertensão estava presente em apenas 23%.

Foster (1969) revisando 75 casos de AAA que evoluíram para a morte por ruptura também verificou que 75% dos casos apresentavam hipertensão diastólica. Outro fator é a doença pulmonar obstrutiva crônica. Nesta doença existe uma produção maior de elastase nos alvéolos aumentando o risco de ruptura pela diminuição da camada elástica arterial (a media). Experiência com membro amputado ao nível da coxa também é um risco a mais de ruptura.

Cronenwett, Katz (1995) citaram 30 fatores de risco para ruptura do AAA, sendo os principais: hipertensão arterial, doença pulmonar obstrutiva crônica, diâmetro do aneurisma, tabagismo, insuficiência renal, sexo masculino, história familiar, doença cardíaca, taxa de crescimento do aneurisma, e a relação do diâmetro do aneurisma com o diâmetro da aorta normal. Após análise multivariável, somente três fatores tiveram risco independente para ruptura, o diâmetro aumentado inicial, a hipertensão arterial, e a doença pulmonar obstrutiva crônica.

Cronenwett, Katz (1995) citaram também que quando estes fatores eram mínimos ou inexistentes o risco de ruptura em 5 anos era de 2%, mas quando os mesmos estavam presentes o risco aproximava de 100%. Por exemplo, um doente com aneurisma de 4 cm de diâmetro, pressão diastólica de 90 mmHg e moderada doença pulmonar obstrutiva crônica foi estimado o risco de ruptura em 10% ao ano. A história familiar de ruptura foi estudada, porém, não foi possível fazer qualquer correlação.

Brown, Powell (1999) encontraram no seguimento de 2257 doentes com AAA com diâmetro inicial de 3 a 6 cm de 1991 a 1998, 1003 casos de ruptura sendo que 76% destes tinham diâmetro igual ou maior que 5 cm.

Cao, De Rango (1999), Gorski, Ricotta (1999) confirmaram que AAA com 5 cm de diâmetro transversal ou maior, associado a outros fatores como a hipertensão arterial, a doença pulmonar crônica obstrutiva e ainda a morfologia do aneurisma aumentaram o risco de ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

2.11.
Diagnósticos clínicos e exames subsidiários

Aneurisma da aorta abdominal pode ser sintomático (dor abdominal, dor lombar, ou isquemia dos membros inferiores) ou assintomático e ser descoberto acidentalmente. Geralmente os aneurismas são assintomáticos. Em um estudo de Estes (1950), de 102 doentes com AAA que foram diagnosticados, 30,4% dos aneurismas eram assintomáticos e foram descobertos em exame físico rotineiro ou durante avaliação de outro problema médico. Séries mais recentes incluem uma proporção mais elevada de aneurisma assintomático, 77,8%.

Aneurisma de aorta abdominal pode ser diagnosticado através de exame físico (Ramos & Côrrea Netto, 1935), radiografias simples de abdômen ou coluna lombar, aortografia, ultra-sonografia, tomografia computadorizada abdominal ou ressonância magnética.

Radiografia da coluna lombar ou de abdômen pode revelar o esboço calcificado de um aneurisma, mas esta calcificação é notada só em 60 a 70% dos doentes com aneurisma diagnosticado.

A ultra-sonografia abdominal é um método que, se em mãos experientes, pode diagnosticar cerca de 100% dos AAA. Tem as vantagens de ser barato, ser realizado facilmente, (às vezes à beira do leito), não emite radiação, podendo ser repetido quando necessário. As principais desvantagens são: a presença de gás intra-abdominal limitando a qualidade do exame e a dificuldade em demonstrar a origem das artérias renais.

A tomografia axial computadorizada (TAC) é um exame de grande especificidade, evidenciando os diâmetros do aneurisma com sensível precisão, identificando as origens das artérias renais e vasos mesentéricos, avaliando as paredes do aneurisma, sendo por isso, importante no diagnóstico daqueles com características inflamatórias. A TAC é o exame de escolha nos casos onde há dúvida sobre a integridade do aneurisma. As principais desvantagens são: preço relativamente elevado, radiação a emissão de Raios-X, uso de contraste, não poder ser realizado à beira do leito e não poder ser feito com freqüência.

A angiorressonância é um exame com sensibilidade semelhante à tomografia quando realizado em aparelhos de 1 a 1,5 Tesla e sem contraste. Com o aperfeiçoamento dos equipamentos e o uso do contraste não iodado este método

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

poderá, no futuro, associado à ultra-sonografia, substituir TAC. Tem a desvantagem de ser caro e não estar disponível na maioria dos hospitais. Na figura 2.13 podemos observar uma imagem gerada por angiorressonância.

Figura 2.13 – Imagem gerada por angiorressonância – Disponível em: http://www.cetac.com.br/ex3.htm - Acessado em: 21/10/2010

2.12. Estudos de modelagens encontradas

Abaixo se apresenta um relato das modelagens encontradas nos artigos pesquisados, não se faz um julgamento das técnicas adotadas, apenas um relato.

Samila e Carter (1981) estudaram a morfologia e as propriedades elásticas da artéria carótida humana sob vários graus de tração e observaram que as fibras de colágeno fazem a rigidez crescer. A resposta inicial do tecido (para baixas deformações) é caracterizada por uma curva linear no gráfico (tensão X deformação) com uma inclinação que reflete a rigidez total da fibra de elastina sozinha. Como o tecido é alongado, as fibras de colágeno se esticam e começam a contribuir para suportar a carga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

Os pesquisadores Raghavan, Marshall Webster e David Vorp (1996) dividiram a parede arterial em três grupos: com orientação longitudinal, circunferencial e normal. Um segmento da parede do aneurisma de aorta abdominal de pacientes cirúrgicos (4-7 cm de comprimento e 1 cm de largura) foi retirado. As amostras são sempre mantidas em concentração salina a 4°C (neste e nos demais ensaios aqui relatados). Foram montados corpos de prova de 4x1cm. Os corpos de prova foram montados em um aparato para teste de tração uniaxial.

As amostras foram assim divididas:

- 52 amostras de orientação longitudinal foram obtidas de 52 pacientes de idade 69 ± 2, de aneurisma de aorta abdominal com diâmetro 6,3 ± 0,2cm;
- 19 amostras circunferencial foram obtidas de 16 pacientes de idade 76 ± 2, de aneurisma de aorta abdominal com diâmetro de 7 ± 0,3cm;
- 7 amostras normais (sem aneurismas) foram obtidas da aorta infra-renal de 7 cadáveres de idade 47 ± 4.

Para eliminar o efeito da histerese do tecido durante o teste, cada molde foi pré-condicionado com carregamento de 7% da deformação em 10 ciclos.

Não se encontrou diferença significativa entre corpos de prova com orientação longitudinal e circunferencial de AAA nem entre Ee (módulo de elasticidade da porção de elastina) e Ec (módulo de elasticidade da porção de colágeno). Na tabela 2.1 podemos observar os dados obtidos, sendo σy a tensão de escoamento do material e σu a tensão de ruptura.

	Ee	Ec	σy	σu
	(N/cm2)	(N/cm2)	(N/cm2)	(N/cm2)
Longitudinal (N=45)	42,1±5,5	408,2± 6,75	65,2± 9,5	86,4± 10,2
Circunferencial (N=16)	55,6± 10,8	539,4± 8,75	70,7± 12,4	101,9± 16
Normal (N=7)	45,3± 15,8	468,1± 11,09	121± 32,8	201,4± 39,4

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas da artéria

As propriedades mecânicas das orientações longitudinais e circunferenciais são similares, sugerem que o material é isotrópico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

As condições de carregamento uniaxial em artérias são bem conhecidas. No entanto, dados mecânicos provenientes de testes uniaxiais são insuficientes para a caracterização tridimensional. O modelo de análise de tensões em 3D do aneurisma de aorta abdominal reportado na literatura é baseado no teste uniaxial.

Os pesquisadores Jonathan Vande Geest, Michael Sacks e David Vorp (2006) realizaram teste de tensão biaxial no tecido de aorta abdominal com aneurisma e sem aneurisma para caracterizar a resposta biaxial para ambos os tipos de tecido. O tecido de aorta abdominal com aneurisma foi obtido de cirurgias reparadoras e o tecido de aorta abdominal sem aneurisma foi obtido de autópsias. A espessura da aorta foi medida em seis pontos diferentes.

As dimensões dos espécimes descarregados foram medidas nas direções circunferencial e longitudinal. O corpo de prova era de formato quadrado (2 x 2 cm), foi montado para a realização do teste de tensão biaxial utilizando-se 4 ganchos de estruturas de náilon em cada um dos lados do espécime com grampos cirúrgicos. O espécime foi montado e alongado nas direções circunferencial e longitudinal. Um pré-carregamento de 0,5 grama foi aplicado em cada espécime antes de começar o teste para eliminar o efeito da histerese do tecido. Foram feitas 4 marcas a uma distancia de (5 mm x 5 mm), e uma câmera foi usada para determinar a deformação do tecido.

Uma tensão controlada foi utilizada para simular a mesma pressão efetiva intra luminal (região por onde passa o sangue) em todos os espécimes. A tensão máxima usada em cada tecido da aorta abdominal (com aneurisma e sem aneurisma) foi de 120Pa, que é a tensão em um tubo cilíndrico fino, com diâmetro de (2 cm) e espessura de (2 mm), consistente com uma típica aorta abdominal, exposta a pressão fisiológica de 113mmHg. Os espécimes foram pré-condicionados com 1 ciclo de 9 repetições de carga e descarga.

Os dois grupos foram assim definidos:

- 26 espécimes de AAA, diâmetro médio de 6,5 ± 2 de 26 pacientes, idade 72,3 ± 1,8;
- 8 espécimes de AA de 8 indivíduos, idade 70,6 ± 1,9.

A espessura média era de 1,49 ± 0,11 para aorta abdominal sem aneurisma e 1,32 ± 0,08 mm para aorta abdominal com aneurisma.

Foram plotados gráficos da resposta típica do tecido de aorta abdominal sem aneurisma e do tecido de aorta abdominal com aneurisma e observado uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

anisotropia, com resistência preferencial na direção circunferencial para o tecido de aorta abdominal com aneurisma quando comparado com o tecido de aorta abdominal sem aneurisma. A tensão cisalhante foi desprezada nos ensaios.

Observou-se que os tecidos são compostos prioritariamente de água. Os pesquisadores Chuong e Fung (1986) realizaram estudos de compressibilidade da parede arterial e verificaram que esta se comporta como um material quase incompressível. Stergiopulos (2004) demonstrou que a camada média da aorta de porco tem propriedades mecânicas similares à aorta humana, pois ela apresenta através da espessura uma distribuição uniforme de uma matriz de proteína e células de músculo vascular. Por esta razão ele concluiu que a camada média da aorta pode ser considerada um meio elástico e homogêneo.

Vasos sangüíneos são conhecidos por apresentar deformações finitas sob condições fisiológicas normais. Por esta razão o tecido arterial tem sido modelado como material hiper-elástico por muitos pesquisadores. Nos trabalhos mais recentes as três camadas da aorta abdominal são modeladas como material incompressível, homogêneo e hiper-elástico sob deformações finitas.

Os pesquisadores Madhavan Raghavan, Jarin Kratzberg, Erasmo Magalhães Castro de Tolosa, Mauro Hanaoka, Patricia Walker e Erasmo Simão da Silva (2006), realizaram a medição do tecido da parede arterial em 394 posições da aorta abdominal com aneurisma. Verificou-se que a espessura varia de 0,23mm (no local da ruptura) a 4,26mm (nos locais onde ocorreu calcificação).

Foram realizados testes mecânicos em um total de 57 espécimes, sendo que 9 espécimes foram eliminados. Os espécimes apresentavam: comprimento de 36,1 ± 4,4mm, largura de 7,8 ± 0,8mm e espessura de 1,7 ± 0,6mm. Não se verificou grandes diferenças das propriedades mecânicas nas orientações longitudinais e circunferencial.

Todos os aneurismas estudados apresentaram variações locais significativas na espessura. No entanto, não foi encontrada nenhuma diferença perceptível na espessura entre um aneurisma grande e um pequeno de aorta abdominal.

Segundo Bosch (2000) a incidência de aneurisma de aorta abdominal triplicou na população ocidental nos últimos 30 anos.

Segundo Raghavan e Vorp (1996) análise de elementos finitos pode desempenhar um papel importante no diagnóstico e tratamento de aneurismas de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

aorta abdominal. Estudos recentes (Fillinger e Venkatasubramaniam) têm mostrado uma correlação entre o risco de ruptura e um pico de tensão na parede do tecido arterial usando a análise de elementos finitos. Este estudo, no entanto, não inclui a presença de trombo intra-luminal (dilatação pela região onde flui o sangue), o qual é comum em 75% dos aneurismas de aorta abdominal. Tais simulações podem conduzir a tensões incorretas quando comparadas com o estado de tensões in vivo.

O teste mecânico biaxial permite a investigação da mecânica anisotrópica de um material e com isso o desenvolvimento de um modelo constitutivo que apresente um comportamento mecânico fisiologicamente apropriado. A implementação de uma relação constitutiva biaxial para o trombo intra-luminal e a análise de elementos finitos pode predizer o estado de tensão para pacientes específicos de aneurisma de aorta abdominal. Por esta razão torna-se interessante investigar o comportamento biomecânico do trombo intra-luminal sob carregamentos multiaxiais.

Nove espécimes de trombo intra-luminal de nove pacientes diferentes com idade de 71 ± 4,5 foram usados neste estudo. Os aneurismas de aorta abdominal apresentavam 5,9 ± 0,4 cm de diâmetro. O pico de tensão (tensão máxima) encontrado no teste biaxial para espécimes com trombo intra-liminal foi de 1.18 ± 0.02 N/cm² e 1.13 ± 0.02 N/cm², para as direções circunferenciais e longitudinais respectivamente.

Devido à forma isotrópica das funções desenhadas, uma formulação isotrópica de W foi considerada:

$$W = \sum_{i=0}^{\infty}\sum_{i=0}^{\infty} a_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \qquad (2.1)$$

Onde W é a energia de deformação por unidade de volume inicial, a_{ij} são constantes do material, I_1 e I_2 são o primeiro e o segundo tensor de deformação de Cauchy-Green.

A relação linear entre I_1 e I_2 para todos os corpos de prova de trombo intra-luminal justificam a exclusão de I_2 da função de energia de deformação. O crescimento linear entre W_1 e I_1 sugere um termo quadrático:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

$$W = a_1(I_1 - 3) + a_2(I_1 - 3)^2 \tag{2.2}$$

$$W_1 = \frac{\partial W}{\partial I_1} \tag{2.3}$$

A resposta mecânica isotrópica foi capturada com sucesso usando a função de energia de deformação polinomial de segunda ordem, anterior. Todos os trombos intra luninal são modelados como material homogêneo isotrópico.

Mower (2000) relata uma redução de 30% do pico de tensão na presença de trombo intra-luminal em grandes aneurismas de aorta abdominal axissimétricos.

Pode ser notado que a relação constitutiva derivada para um material isotrópico testado uniaxialmente e biaxialmente serão diferentes. Para ilustrar isso para o trombo intra-luminal, a energia de deformação para a relação constitutiva obtida por Wang para a camada luminal é comparada com a energia de deformação biaxial obtida neste estudo. O gráfico das duas energias pode ser observado abaixo.

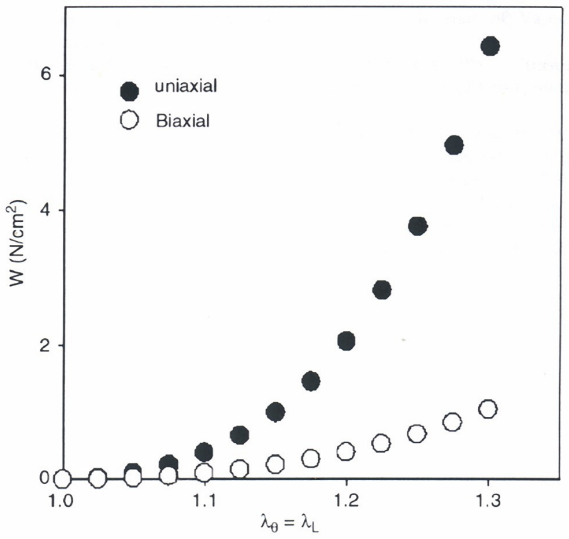

Figura 2.14 – Gráfico de energia da camada luminal

Os pesquisadores D. P. Sokolis, H. Boudoulas e P. Karayannacos (2002) realizaram estudos sobre o comportamento do tecido da aorta de 15 coelhos e 20 porcos. Foram realizados dez ciclos de carga e descarga para eliminar o efeito de histerese.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

A expressão escolhida para a tensão S foi a expressão de Kirchhoff, obtida pela divisão da força F pela área indeformada A_0, do espécime e pelo raio de extensão λ:

$$S = \frac{F}{A_0\lambda} = \frac{F}{w_0 t_0 \lambda} = \frac{T}{\lambda} \tag{2.4}$$

Onde w_0 e t_0 são a largura e a espessura e T indica a tensão na forma Lagrangeana como $T = \frac{F}{A_0}$. O raio de extensão λ é definido como $\lambda = \frac{l}{l_0} = l_0 + \frac{\Delta l}{l_0}$.

A expressão para a deformação não linear E, Green - St. Venant, foi escrita em termos do raio de extensão longitudinal, λ, como mostrado por Fung:

$$E = \frac{1}{2}(\lambda^2 - 1) \tag{2.5}$$

E o módulo elástico, M, foi calculado como a primeira derivada da tensão S em relação a deformação E:

$$M = \frac{dS}{dE} \tag{2.6}$$

Muitos tipos de curvas, entre elas, bi-linear, polinomial, exponencial e outras, foram testadas para os resultados de tensão-deformação obtidos. A função polinomial de sétima ordem:

$$S = p_0 + p_1 E + p_2 E^2 + p_3 E^3 + p_4 E^4 + p_5 E^5 + p_6 E^6 + p_7 E^7 \tag{2.7}$$

simula muito bem os dados experimentais obtidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

A forma geral da curva tensão-deformação apresentada com este estudo é similar com a obtida em outras investigações, na qual foram utilizados testes de carregamento uniaxial.

A parede arterial tem sido modelada com tensão uniaxial por muitos pesquisadores, como um material não linear, usando equações constitutivas expressas em termos polinomiais (Patel e Vaishnav, 1972; Loree, 1994), exponencial (Fung, 1967, 1972; Tanaka e Fung, 1974; Hayashi, 1981; He e Roach, 1994) e funções bi-linear (Haut, 1980).

2.13. Estudo microscópico do tecido arterial

A aorta serve para regularizar a pressão e o fluxo de sangue no interior do sistema cardiovascular. A aorta é um vaso de grande calibre, cuja resposta mecânica é predominantemente atribuída à camada média, porque esta é a camada mais espessada da aorta e também a mais organizada. Estudos anteriores (Wolinsky e Glagov, 1967; Clark e Glagov, 1985) demonstraram que a camada média da aorta é constituída por lâminas cilíndricas concêntricas, as quais servem para construir a parede arterial. A camada média contém duas camadas de elastina separadas por uma camada de células muscular e de colágeno. A elastina e o colágeno são os componentes principais que determinam as propriedades mecânicas passivas da parede arterial, enquanto as células de músculo são as responsáveis pelas propriedades mecânicas ativas e a produção da matriz extra celular.

Os pesquisadores Dimitrios Sokolis, Emmanuel Kefaloyannis, Mirsini Kouloukoussa, Evangelos Marinos, Harisios Boudoulas e Panayotis Karayannacos (2006) realizaram estudos com o tecido arterial de trinta e cinco coelhos. Foram realizados testes uiniaxiais quase estáticos nos espécimes recolhidos, para redução da histerese foram realizados dez ciclos de carga e descarga nos espécimes. A análise das tensões foi à mesma adotada por Raghavan e Vorp (descrita anteriormente).

Os pesquisadores estressaram os espécimes obtidos por algumas horas e compararam o tecido estressado com a vizinhança do tecido que permaneceu

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA

tracionado por 1 mês, a deformação foi à mesma em ambos os espécimes. Não foram apreciadas diferenças significativas na estrutura de elastina e colágeno em cada nível de tensão examinado, mas o longo tempo de fixação produziu deformações residuais. O objetivo de estudar espécimes tracionados após um mês de fixação é observar a organização das fibras de colágeno e elastina submetidas a grandes tensões.

Quando o espécime de tecido arterial não está sob tensão as camadas de elastina presentes são onduladas e dobradas, orientadas tanto na direção circunferencial quanto longitudinal na parede arterial. O pré-condicionamento não afeta a distribuição espacial, orientação e ondulação das lâminas de elastina. Posteriormente ao pré-condicionamento, sob tensão aplicada longitudinalmente, primeiro a elastina desdobra-se, posteriormente sob grande tensão a lamina de elastina sofre extensão.

A aparência enrugada e a orientação desordenada das fibras de colágeno são claramente observadas nas seções longitudinais na parede arterial sem tração. Na seção transversal as fibras de colágeno são vistas como um longo pacote ondulado, e como fibras enrugadas curtas sem arranjo consistente. A configuração das fibras de colágeno não muda com o pré-condicionamento, da mesma forma que as fibras de elastina. Com a aplicação de tensões crescentes as fibras de colágeno se reorientam na direção da tensão, alinhando-se de forma paralela.

Na figura 2.15 podemos observar a configuração esquemática das fibras de elastina (a) e colágeno (b):

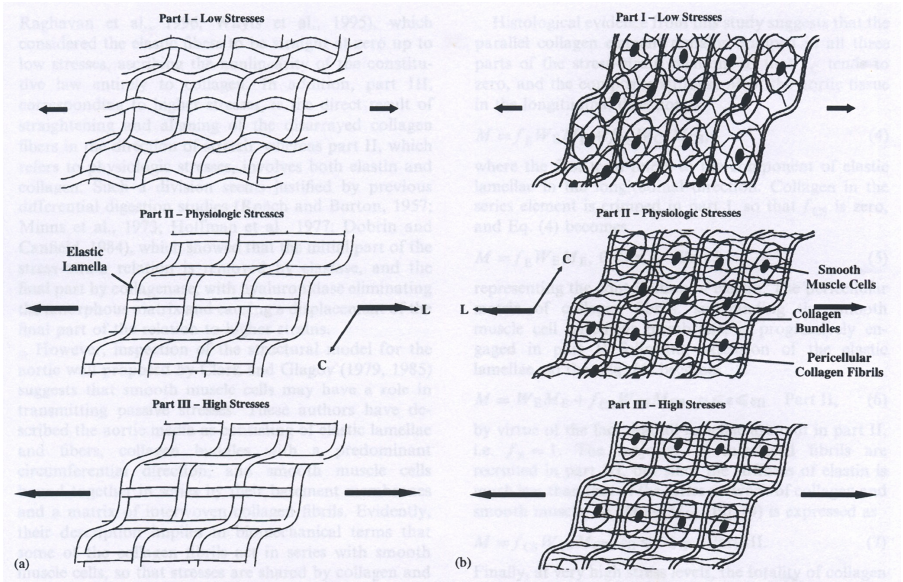

Figura 2.15 - Microscopia realizada no tecido arterial – D. P. Sokolis (2006)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621274/CA