

Reparo aberto de aneurisma de aorta toracoabdominal: atualização da abordagem multimodal

Open TAAA repair: updates on multimodal approach

Roberto Chiesa¹, Germano Melissano¹, Enrico Rinaldi¹

A cirurgia convencional de aneurismas de aorta toracoabdominal (AATA) evoluiu de maneira significativa ao longo das últimas décadas graças a refinamentos técnicos, especialmente com relação à proteção visceral. Entretanto, apesar das estratégias adjuntivas, as taxas de morbidade e mortalidade ainda não são negligenciáveis.

Com o intuito de planejar a melhor modalidade terapêutica para cada paciente, imagens precisas devem ser obtidas e processadas. O método de imagem de escolha para efetuar esse planejamento é a angiotomografia computadorizada *multislice*. Além de definir os diâmetros e a extensão do aneurisma, a análise dos vasos envolvidos inclui características importantes como calcificação e presença de trombo, possíveis variações anatômicas e patência dos vasos. No momento, o diâmetro aórtico é o melhor preditor do risco de rotura¹, e os pacientes portadores de AATA devem ser considerados para cirurgia eletiva se o diâmetro aórtico exceder 6,0 cm, ou com diâmetros menores no caso de pacientes com dissecação crônica ou doenças do tecido conjuntivo.

Com o envelhecimento da população, observa-se um aumento do número de comorbidades nos pacientes portadores de AATA. Uma adequada avaliação pré-operatória das funções cardíaca, pulmonar e renal e o conhecimento minucioso da anatomia vascular cerebral e da medula espinhal são úteis durante a avaliação do risco operatório e para o planejamento da melhor estratégia cirúrgica.

O ecocardiograma transtorácico pré-operatório é um satisfatório método de rastreamento não invasivo que avalia tanto a função valvular quanto a biventricular. A angiotomografia de artérias coronárias emergiu como um método não invasivo capaz de avaliar a doença arterial coronariana, que deve ser realizado de rotina em pacientes portadores de AATA assintomático. Em caso de doença arterial coronariana importante, o cateterismo cardíaco deve ser realizado, e as lesões significativas devem ser

tratadas com angioplastia transluminal percutânea e colocação de stent anteriormente ao reparo cirúrgico do AATA. Deve-se evitar, quando possível, a inserção de stents farmacológicos que podem exigir dupla antiagregação plaquetária por período prolongado. A revascularização do miocárdio limita-se a pacientes selecionados, portadores de lesões coronarianas severas de alto risco e inadequados para angioplastia transluminal percutânea.

A função renal constitui um preditor estabelecido da evolução pós-operatória. Com base na avaliação da taxa de filtração glomerular estimada, a doença renal crônica demonstrou ser um importante preditor de morte tanto após a correção convencional quanto após a correção endovascular dos aneurismas torácicos, até mesmo em pacientes sem evidências clínicas de doença renal pré-operatória².

A avaliação da função pulmonar com gasometria arterial e espirometria deve ser realizada em todos os pacientes que serão submetidos a correção convencional do AATA. A tomografia cerebral e a avaliação neuropsicológica são realizadas eletivamente. Anomalias anatômicas ou doenças cerebrais que possam contraindicar a drenagem líquórica devem ser identificadas. A estratégia cirúrgica deve ser explicada no pré-operatório para todos os pacientes eletivos, e o consentimento informado deve ser obtido.

No tocante à estratégia cirúrgica, o paciente é posicionado em decúbito lateral direito sob um colchão de areia com os ombros a 60 graus e o quadril flexionado posteriormente a 30 graus para permitir acesso total ao tórax esquerdo, ao abdome e à região inguinal esquerda. Um colchão térmico de água circulante com permutador de calor é colocado entre o colchão de areia e o paciente, com o intuito de auxiliar na manutenção da temperatura corporal.

As incisões para toracotomia variam em comprimento e nível, de acordo com a extensão do aneurisma. A prática padrão é a secção deliberada da costela do espaço intercostal incisado posteriormente, para evitar

¹ San Raffaele Scientific Institute, Vita-Salute University, Faculdade de Medicina, Cirurgia Vascular, Milão, Itália.

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Os autores declararam não haver conflitos de interesse que precisam ser informados.

Submetido em: Maio 11, 2017. Aceito em: Maio 22, 2017.

fraturas espontâneas com margens agudas irregulares. A paralisia do hemidiafragma esquerdo causada por sua divisão radial no hiato aórtico pode contribuir significativamente para insuficiência respiratória pós-operatória; portanto, a secção circunferencial limitada do diafragma é rotineiramente realizada, com preservação do centro frênico. Sob condições anatômicas favoráveis, a secção circunferencial do diafragma demonstrou reduzir o tempo de desmame respiratório³.

O clampeamento da aorta torácica descendente promove relevantes alterações hemodinâmicas, incluindo importante aumento da pós-carga e da isquemia visceral. A técnica para perfusão aórtica distal com circulação extracorpórea, denominada *left heart bypass* (LHB), provou ser extremamente útil durante o reparo aórtico. O fundamento do LHB consiste em fornecer fluxo sanguíneo para medula espinhal, vísceras e rins durante o período de clampeamento aórtico, associado à redução na hipertensão proximal e na pós-carga cardíaca. A veia pulmonar esquerda é comumente canulada para drenagem do sangue arterial, que será reinfundido através de bomba centrífuga (BioPump® - Medtronic Biomedicus, Inc., Minneapolis, MN, USA) na aorta subdiafragmática ou na artéria femoral comum esquerda⁴.

Após o início do LHB, a aorta é cuidadosamente clampeada em seu segmento mais apropriado, imediatamente após a artéria subclávia esquerda (ASE) ou entre a artéria carótida comum esquerda e a ASE quando o aneurisma envolver a aorta descendente proximal. Uma vez que a porção proximal da aorta estiver isolada entre os clampes, a aorta torácica descendente é seccionada e isolada do esôfago. O sangramento proveniente das artérias intercostais proximais é controlado com suturas reforçadas com *pledgets*. A porção proximal da prótese é anastomosada na aorta torácica descendente através de sutura contínua, com uso de fio monofilamentar de polipropileno 2/0 ou 3/0. A anastomose é reforçada com faixas de teflon ou *pledgets*.

Exceto em pacientes portadores de *shaggy aorta* (aorta com lesões ulcerativas e trombos), em que a aorta é clampeada logo acima e abaixo do aneurisma a fim de reduzir o risco de embolia, rotineiramente o clampe aórtico distal é removido e reposicionado na aorta torácica distal acima do tronco celiaco (clampeamento sequencial), e o aneurisma é aberto.

As artérias segmentares principais e patentes de T7 a L2 são identificadas e temporariamente ocluídas com cateteres de Pruitt para evitar o fenômeno de roubo de fluxo. Com base na monitorização neurofisiológica, as artérias intercostais devem ser reimplantadas a

partir de incisão protética lateral e confecção de *patch* através da *island technique*. As artérias intercostais principais também podem ser reimplantadas através da interposição de enxerto protético.

O clampe distal é então posicionado abaixo das artérias renais, e o aneurisma é aberto. A perfusão hemática visceral é mantida pela bomba com auxílio de cateteres de oclusão-irrigação introduzidos seletivamente no tronco celiaco e na artéria mesentérica superior. A perfusão renal fria e seletiva é realizada: inicialmente, uma solução cristalóide com manitol e esteroides a 4 °C era utilizada; entretanto, seguindo as evidências de melhor preservação da função renal com a perfusão com custodiol (histidina-triptofano-quetoglutarato)⁵, recentemente introduzimos o uso rotineiro dessa solução em nossos pacientes.

Se uma estenose serrada for observada antes da colocação do cateter de oclusão-irrigação, a colocação de um stent ostial pode ser efetuada pela inserção de um stent expansível por balão de tamanho apropriado dentro da artéria. Uma incisão lateral é confeccionada no enxerto protético, e o tronco celiaco, e a artéria mesentérica superior e as artérias renais são reimplantadas através de *patch* de Carrel. A fim de reduzir a quantidade de aorta nativa, a artéria renal esquerda é habitualmente reimplantada separadamente através da interposição de um enxerto de dácron.

Por fim, é realizada a anastomose terminoterminal com a porção aórtica distal, e o último clampe é removido. Em alguns casos (AATA de tipo I), as artérias viscerais podem ser incorporadas em uma anastomose distal biselada.

No caso de reimplante seletivo dos vasos viscerais ou renais, a prótese vascular Gore Hybrid® (Gore Hybrid Vascular Graft – GHVG, Flagstaff, Arizona, EUA) pode ser utilizada. O segmento de stent constrito do GHVG é minuciosamente inserido em 2-3 cm dentro da luz arterial, através do fio-guia, em relação aos ramos colaterais, e então liberado.

A pós-dilatação do *stent* é realizada em todos os casos após a liberação do segmento distal do GHVG com auxílio de balão não complacente de 5-6 mm. O *stent* é então mantido em posição com pontos simples de polipropileno monofilamentar, confeccionados circunferencialmente ao vaso. Por fim, a anastomose proximal do GHVG no enxerto aórtico principal é realizada de maneira usual após a secção da porção proximal da prótese, sem stent, com comprimento apropriado⁶.

A lesão da medula espinhal durante os procedimentos toracoabdominais ocorre principalmente devido a um insulto isquêmico. Entretanto, sua fisiopatologia é extremamente complexa e ainda muito pouco

compreendida. Como recentemente publicado, a incidência de isquemia medular após a cirurgia convencional de AATA, em particular os aneurismas extensos do tipo II, ainda constitui um problema, com uma taxa de apresentação de 9,6%⁷. A isquemia medular pode resultar em deficiência física devastante e em sobrevida muito reduzida no seguimento pós-operatório⁸.

A proteção da medula espinhal representa uma etapa fundamental da estratégia pré-operatória e intraoperatória do tratamento do AATA, e uma abordagem multidisciplinar é necessária. O tempo de clampeamento aórtico constitui o preditor pós-operatório mais importante de paraplegia na cirurgia convencional. Na tentativa de reduzir o tempo de isquemia, diversas técnicas de perfusão aórtica distal associadas ao clampeamento sequencial foram introduzidas para permitir a perfusão dos vasos nutridores da medula espinhal durante o período de clampeamento aórtico. O efeito protetor do LHB associado ao clampeamento aórtico sequencial, em comparação à realização da técnica *clamp and sew*, já foi publicado⁹.

A importância do reimplante das artérias intercostais principais na redução do risco de paraparesia/paraplegia pós-operatória é bem demonstrada¹⁰. Esse procedimento, entretanto, é demorado, e um segmento extenso de aorta reimplantado pode tornar-se propenso a dilatação futura; portanto, recomendamos evitar reimplantes desnecessários, especialmente em pacientes portadores de doenças do tecido conjuntivo. Avanços recentes nos métodos de imagem podem desempenhar um papel relevante no planejamento do reimplante seletivo das artérias intercostais principais¹¹.

A otimização da perfusão medular, que eleva a pressão arterial sistêmica e reduz a pressão do líquido cefalorraquidiano, é também utilizada para a prevenção e o tratamento da isquemia medular. A estabilidade hemodinâmica é muito importante, e a pressão arterial média deve ser mantida, em geral, acima de 70 mmHg.

A pressão do líquido cefalorraquidiano eleva-se imediatamente após o clampeamento aórtico e após a isquemia medular. Juntamente à diminuição da pressão de perfusão medular, esse mecanismo pode ser uma das principais causas de isquemia medular. A pressão do líquido cefalorraquidiano pode ser facilmente monitorizada, e a drenagem do liquor com o intuito de reduzir sua pressão a níveis abaixo de 10 cmH₂O é amplamente praticada. Uma revisão da literatura confirmou a eficácia da drenagem do líquido cefalorraquidiano na prevenção e no tratamento da isquemia medular após o tratamento do aneurisma torácico e do AATA¹². A drenagem do

líquido cefalorraquidiano pode ser realizada com segurança com o uso do LiquoGuard® (Möller Medical GmbH, Fulda, Alemanha), um novo dispositivo para drenagem líquórica controlada e contínua, projetado para manter a pressão do líquido cefalorraquidiano próxima aos valores desejados. Isso evita a drenagem desnecessária e permite a monitorização simultânea da pressão líquórica e sua drenagem ativa¹³.

A detecção precoce da isquemia medular é essencial para permitir uma intervenção imediata antes que a isquemia evolua para infarto e paraplegia permanente. A monitorização neurológica da função medular pode ser realizada em pacientes anestesiados com a análise dos potenciais evocados somatossensoriais e dos potenciais evocados motores ou de ambos¹⁴. Os registros da linha de base são obtidos após a indução anestésica e intubação, a fim de garantir as medições quando o estado anestésico de estabilidade for atingido e o efeito da dose inicial do relaxante muscular desaparecer. Os potenciais evocados motores são verificados intermitentemente até que a aorta seja clampeada e a cada 5 minutos durante e após o clampeamento aórtico. A perda persistente dos potenciais evocados motores em três estimulações consecutivas é considerada significativa e utilizada como um “sinal de alarme intraoperatório” para manobras perioperatórias adicionais.

Na última década, houve uma melhora significativa na correção convencional do AATA, o que levou a uma redução na mortalidade precoce e nas complicações neurológicas, com uma mortalidade média em 30 dias de 7% e uma taxa de isquemia medular média de 7,5%¹⁵. Além disso, nos últimos anos, em centros de excelência e alto volume, métodos auxiliares para proteção renal reduziram a incidência de insuficiência renal após o reparo convencional do AATA⁵.

A cirurgia convencional do AATA, graças às melhorias técnicas, é atualmente o padrão-ouro em pacientes adequados. A seleção dos pacientes deve ser baseada em uma cuidadosa avaliação pré-operatória e de risco cirúrgico. A correção cirúrgica do AATA é melhor realizada em centros de alto volume por cirurgiões experientes e equipes multidisciplinares qualificadas.

REFERÊNCIAS

1. Hiratzka LF, Bakris GL, Beckman JA, et al. 2010 ACCF/AHA/AATS/ACR/ASA/SCA/SCAI/SIR/STS/SVM guidelines for the diagnosis and management of patients with Thoracic Aortic Disease: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines, American Association for Thoracic Surgery, American College of Radiology, American Stroke Association, Society of Cardiovascular Anesthesiologists, Society for Cardiovascular Angiography and

- Interventions, Society of Interventional Radiology, Society of Thoracic Surgeons, and Society for Vascular Medicine. *Circulation*. 2010;121(13):e266-369. PMID:20233780.
2. Mills JL Sr, Duong ST, Leon LR Jr, et al. Comparison of the effects of open and endovascular aortic aneurysm repair on long-term renal function using chronic kidney disease staging based on glomerular filtration rate. *J Vasc Surg*. 2008;47(6):1141-9. PMID:18514831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2008.01.039>.
 3. Engle J, Safi HJ, Miller CC 3rd, et al. The impact of diaphragm management on prolonged ventilator support after thoracoabdominal aortic repair. *J Vasc Surg*. 1999;29(1):150-6. PMID:9882799. [http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214\(99\)70356-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214(99)70356-3).
 4. Coselli JS, Bozinovski J, LeMaire SA. Open surgical repair of 2286 thoracoabdominal aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg*. 2007;83(2):862-92. PMID:17257942. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2006.10.088>.
 5. Tshomba Y, Kahlberg A, Melissano G, et al. Comparison of renal perfusion solutions during thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2014;59(3):623-33. PMID:24377947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2013.09.055>.
 6. Chiesa R, Kahlberg A, Mascia D, Tshomba Y, Civilini E, Melissano G. Use of a novel hybrid vascular graft for sutureless revascularization of the renal arteries during open thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2014;60(3):622-30. PMID:24768367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2014.03.256>.
 7. Coselli JS, LeMaire SA, Preventza O, et al. Outcomes of 3309 thoracoabdominal aortic aneurysm repairs. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2016;151(5):1323-37. PMID:26898979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtcvs.2015.12.050>.
 8. Wong DR, Coselli JS, Amerman K, et al. Delayed spinal cord deficits after thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Surg*. 2007;83(4):1345-55. PMID:17383338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2006.11.035>.
 9. Coselli JS. The use of left heart bypass in the repair of thoracoabdominal aortic aneurysms: current techniques and results. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*. 2003;15(4):326-32. PMID:14710373. [http://dx.doi.org/10.1053/S1043-0679\(03\)00090-X](http://dx.doi.org/10.1053/S1043-0679(03)00090-X).
 10. Safi HJ, Miller CC 3rd, Carr C, Iliopoulos DC, Dorsay DA, Baldwin JC. Importance of intercostal artery reattachment during thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 1998;27(1):58-68. PMID:9474083. [http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214\(98\)70292-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214(98)70292-7).
 11. Melissano G, Bertoglio L, Rinaldi E, Leopardi M, Chiesa R. An anatomical review of spinal cord blood supply. *J Cardiovasc Surg (Torino)*. 2015;56(5):699-706. PMID:25881616.
 12. Cinà CS, Abouzahr L, Arena GO, Laganà A, Devereaux PJ, Farrokhyar F. Cerebrospinal fluid drainage to prevent paraplegia during thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysm surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Vasc Surg*. 2004;40(1):36-44. PMID:15218460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2004.03.017>.
 13. Tshomba Y, Leopardi M, Mascia D, et al. Automated pressure-controlled cerebrospinal fluid drainage during open thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2017;66(1):37-44. PMID:28216365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2016.11.057>.
 14. Koeppel TA, Mess WH, Jacobs MJ. Motor evoked potentials in thoracoabdominal aortic surgery: PRO. *Cardiol Clin*. 2010;28(2):351-60. PMID:20452553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccl.2010.01.013>.
 15. Piazza M, Ricotta JJ 2nd. Open surgical repair of thoracoabdominal aortic aneurysms. *Ann Vasc Surg*. 2012;26(4):600-5. PMID:22188939. <http://dx.doi.org/10.1016/j.avsg.2011.11.002>.

Correspondência

Roberto Chiesa
Departamento de Cirurgia Vascular
Università Vita-Salute San Raffaele
Ospedale San Raffaele, Via Olgettina 60
20100, Milão, Itália
Tel: +39 02 2643 7165
E-mail: chiesa.roberto@hsr.it

Informações sobre os autores

RC - Professor Titular de Cirurgia Vascular, Vita-Salute San Raffaele University.
GM - Professor Associado de Cirurgia Vascular, Vita-Salute San Raffaele University.
ER - Cirurgião Sênior, Departamento de Cirurgia Vascular, H. San Raffaele.

Open TAAA repair: updates on multimodal approach

Reparo aberto de aneurisma de aorta toracoabdominal: atualização da abordagem multimodal

Roberto Chiesa¹, Germano Melissano¹, Enrico Rinaldi¹

Open surgical repair of thoracoabdominal aortic aneurysms (TAAA) has evolved significantly over the last decades thanks to technical improvements, especially in the area of organ protection. However, despite adjunctive strategies, morbidity and mortality rates are still not negligible.

In order to plan the best possible treatment modality for every patient, accurate imaging must be obtained and processed. The preferred imaging method is multidetector computed tomography (CT) scan. As well as defining diameters and extension of the pathology, analysis of vessels includes characteristics of calcification and thrombus, possible anatomic variations, and patency of vessels. At present, aortic diameter is the best criterion for predicting the risk of aortic rupture¹ and patients with TAAA can be considered for elective surgery if the aortic diameter exceeds 6.0 cm, or less in case of patients with chronic dissection or a connective tissue disorder.

As the number of elderly people in the population has increased, so has the number of patients with TAAA associated with comorbidities. An adequate pre-operative assessment of cardiac, pulmonary, and renal function and an accurate knowledge of cerebral and spinal cord vascular anatomy are useful when evaluating operative risk and planning the best operative strategy.

Pre-operative trans-thoracic echocardiography is a satisfactory noninvasive screening method that evaluates both valvular and biventricular function. Computed tomographic coronary angiography has emerged as a less-invasive method for assessing coronary artery disease and is routinely performed in patients with asymptomatic TAAA. In case of severe coronary artery disease, a coronary angiography is then performed and significant lesions are treated with percutaneous transluminal angioplasty prior to aneurysm repair, possibly avoiding the use of drug-eluting stents that would require prolonged double antiplatelet therapy. Surgical myocardial

revascularization is limited to selected patients with severe high-risk coronary lesions that are not suitable for percutaneous transluminal angioplasty.

Renal function is an established predictor of postoperative outcome. Based on eGFR assessment, chronic kidney disease has been shown to be a strong predictor of death after thoracic aneurysm repair for both open and endovascular procedures, even in patients without clinical evidence of preoperative renal disease.²

Evaluation of pulmonary function with arterial blood gases and spirometry is performed for all patients undergoing open TAAA repair.

A CT brain scan and neuropsychological evaluation are performed in the elective setting. Anatomical anomalies or cerebral diseases that may contraindicate the use of Cerebrospinal fluid (CSF) drainage should be identified.

Surgical strategy is preoperatively explained to any elective patient and informed consent is obtained.

With regard to surgical strategy, the patient is positioned in a right lateral decubitus over a beanbag with the shoulders at 60° and the hips flexed back to 30° to access the entire left thorax, the abdomen, and the left groin. A circulating water mattress with heat exchanger is placed between the beanbag and the patient, in order to facilitate body temperature management.

The thoracotomy incision varies in length and level, depending on the extent of the aneurysm. Our standard practice is to deliberately cut the rib of the incised intercostal space posteriorly, in order to avoid spontaneous fractures with irregular acute margins. Since paralysis of the left hemidiaphragm produced by its radial division to the aortic hiatus may contribute significantly to postoperative respiratory failure, a limited circumferential section of the diaphragm is routinely carried out, sparing the phrenic center. Under favorable anatomic conditions, this has been shown to reduce respiratory weaning time.³

¹ San Raffaele Scientific Institute, Vita-Salute University, School of Medicine, Vascular Surgery, Milano, Italy.
Financial support: None.

Conflicts of interest: No conflicts of interest declared concerning the publication of this article.
Submitted: May 11, 2017. Accepted: May 22, 2017.

Cross-clamping of the descending thoracic aorta leads to several hemodynamic disturbances, including severe afterload increase and organ ischemia. The technique for distal aortic perfusion with a left heart bypass (LHB) has proved to be extremely useful during aortic repair. The rationale of LHB is providing flow to the spinal cord, viscera, and kidneys during the aortic cross-clamp period, together with reduction of proximal hypertension and afterload to the heart. The left pulmonary vein is usually cannulated to drain arterial blood, which is reinfused through a centrifugal pump (BioPump® - Medtronic Biomedicus, Inc., Minneapolis, MN, USA) into the subdiaphragmatic aorta or the common left femoral artery.⁴

After the LHB is started, the aorta is gently cross-clamped at the most appropriate site, either immediately after the left subclavian artery (LSA) or between the left common carotid artery and LSA when the aneurysm involves the proximal descending aorta. Once the proximal aspect of the aorta is isolated between clamps, the descending thoracic aorta is transected and separated from the esophagus. Bleeding proximal intercostal arteries are oversewn with pledgeted sutures. The proximal end of the graft is sutured to the descending thoracic aorta using 2/0 or 3/0 monofilament polypropylene in a running fashion and the anastomosis is reinforced with Teflon felt or pledgets.

Except for patients with “shaggy aorta” in which the aorta is clamped just above and below the aneurysm in order to reduce the risk of embolism, routinely, the distal aortic clamp is removed and reapplied onto the distal thoracic aorta above the celiac axis (sequential cross-clamping) and the aneurysm is opened.

Critical patent segmental arteries from T7 to L2 are identified and temporarily occluded with Pruitt catheters to avoid the blood-steal phenomenon. Depending on neurophysiologic monitoring, the intercostal arteries may be reattached to a tailored side-cut in the graft by means of an island technique. Critical intercostal arteries may also be selectively reattached with a tube graft interposition.

The distal clamp is then moved below the renal arteries and the aneurysm is opened. Visceral hematic perfusion is maintained by the pump with irrigation-occlusion catheters introduced selectively into the celiac trunk and the superior mesenteric artery. Selective cold perfusion of renal arteries is performed: initially a crystalloid solution with mannitol and steroids at 4 °C was used; however, following evidence of improved kidney preservation by perfusion with Custodiol (histidine-tryptophane-ketoglutarate),⁵

we recently introduced routine use of this solution in our patients.

If a tight stenosis is encountered, before placing the irrigation occlusion catheter, orificial stenting may be accomplished by direct placement of an appropriate-sized balloon expandable stent within the artery. A side cut is tailored in the graft and the celiac trunk, superior mesenteric artery, and renal arteries are reattached by means of a Carrel patch. To reduce the amount of native aorta, the left renal artery is usually reattached separately via a Dacron graft interposition.

Finally, an end-to-end anastomosis with the distal aorta is performed and the last clamp removed. In some cases (Extent I) the visceral arteries can be incorporated in a beveled distal anastomosis.

In case of selective reattachment of visceral or renal vessels, a gore hybrid vascular graft (GHVG - Hybrid Gore, Flagstaff, Arizona USA) can be used. The constrained stented segment of the GHVG is gently placed over-the-wire into the artery for 2 to 3 cm, with respect of collateral branches, and then deployed. Stent post-dilation is performed in all cases after GHVG distal segment deployment with a 5- to 6-mm noncompliant balloon. The stent is then sewn in place with single circumferential monofilament polypropylene stitches. Finally, the proximal anastomosis to the main aortic graft is completed in the usual fashion after the proximal unstented section of the graft is cut to the proper length.⁶

Spinal cord (SC) damage during thoracoabdominal procedures is mainly due to ischemic insult. However, its pathophysiology is much more complex and still poorly understood. As recently reported, the incidence of SC ischemia following open TAAA repair, particularly in extensive type II aneurysms, still remains a problem with a rate of presentation of 9.6%.⁷ Spinal cord ischemia may result in devastating physical disability and a much reduced survival at follow-up.⁸

Spinal cord protection represent a fundamental part of the pre-operative and intra-operative TAAA management strategy, and a multimodal approach is advocated. Aortic cross-clamp time is the most significant predictor of postoperative paraplegia in open surgery. In an attempt to reduce ischemia time, several techniques for distal aortic perfusion associated with sequential clamping were introduced to allow perfusion of vessels feeding the SC while the aorta is clamped. It has been reported that left heart bypass combined with sequential clamping has a protective effect, compared with the simple “clamp and sew” technique.⁹

The importance of reattachment of critical intercostal arteries to reduce the risk of postoperative paraparesis/paraplegia is well demonstrated.¹⁰ This procedure, however, is time-consuming and a large aortic reattached island may be prone to further dilatation and so it would be probably be better to avoid unnecessary reimplantations, especially in patients with connective tissue disorders. Recent advances in imaging may play a role in planning selective reimplantation of important SC arteries.¹¹

Optimizing SC perfusion by raising arterial systemic blood pressure and reducing CSF pressure is also used for prevention and treatment of SC ischemia. Hemodynamic stability is very important and in general mean arterial pressure should be maintained over 70 mmHg.

Cerebrospinal fluid pressure rises immediately after cross-clamping and after SC ischemia. Coupled with decreased spinal perfusion pressure, this mechanism may be one of the major causes of SC ischemia. The CSF pressure can be easily monitored, and drainage of CSF to reduce the pressure to below 10 cmH₂O is widely practiced. A review of the literature has confirmed the effectiveness of CSF drainage to prevent and treat SC ischemia after treatment for thoracic aneurysms and TAAA.¹² Cerebrospinal fluid drainage could be safely performed with LiquoGuard (Möller Medical GmbH, Fulda, Germany) a new device for controlled and continuous CSF drainage designed to maintain CSF pressure around the desired set values, avoiding unnecessary drainage and allowing simultaneous monitoring of CSF pressure and active drainage.¹³

Early detection of SC ischemia is critical to allow prompt intervention before ischemia evolves to infarction and permanent paraplegia. Neurologic monitoring of SC function can be performed in anesthetized patients with somatosensory evoked potentials (SSEP), motor evoked potentials (MEP), or both.¹⁴ Baseline recordings are obtained after induction of anesthesia and intubation in order to guarantee the measurements when a steady anesthetic state has been reached and the effect of the initial dose of muscle relaxant has disappeared. Motor evoked potentials are checked intermittently until the aorta is cross-clamped and every 5 minutes during and after cross-clamping. Persistent MEP loss in three consecutive stimulations is considered significant and used as an “intraoperative alarm sign” for additional intraoperative maneuvers.

In the past decade, there has been a dramatic improvement in open TAAA repair, leading to reductions in early mortality and neurologic complications, with a current mean 30-day mortality of 7% and an overall

mean spinal cord ischemia of 7.5%.¹⁵ Moreover, in recent years in high volume centers, technical adjuncts for renal protection have reduced the incidence of renal failure following open TAAA repair.⁵

Thanks to technical improvements, open surgical repair of TAAA, is currently the gold standard in fit patients. Patient selection must be based on careful preoperative assessment and risk evaluation. Surgical TAAA repair is best performed in high-volume centers by experienced surgeons and skilled multidisciplinary teams.

REFERENCES

- Hiratzka LF, Bakris GL, Beckman JA, et al. 2010 ACCF/AHA/AATS/ACR/ASA/SCA/SCAI/SIR/STS/SVM guidelines for the diagnosis and management of patients with Thoracic Aortic Disease: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines, American Association for Thoracic Surgery, American College of Radiology, American Stroke Association, Society of Cardiovascular Anesthesiologists, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Interventional Radiology, Society of Thoracic Surgeons, and Society for Vascular Medicine. *Circulation*. 2010;121(13):e266-369. PMID:20233780.
- Mills JL Sr, Duong ST, Leon LR Jr, et al. Comparison of the effects of open and endovascular aortic aneurysm repair on long-term renal function using chronic kidney disease staging based on glomerular filtration rate. *J Vasc Surg*. 2008;47(6):1141-9. PMID:18514831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2008.01.039>.
- Engle J, Safi HJ, Miller CC 3rd, et al. The impact of diaphragm management on prolonged ventilator support after thoracoabdominal aortic repair. *J Vasc Surg*. 1999;29(1):150-6. PMID:9882799. [http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214\(99\)70356-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214(99)70356-3).
- Coselli JS, Bozinovski J, LeMaire SA. Open surgical repair of 2286 thoracoabdominal aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg*. 2007;83(2):862-92. PMID:17257942. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2006.10.088>.
- Tshomba Y, Kahlberg A, Melissano G, et al. Comparison of renal perfusion solutions during thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2014;59(3):623-33. PMID:24377947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2013.09.055>.
- Chiesa R, Kahlberg A, Mascia D, Tshomba Y, Civolini E, Melissano G. Use of a novel hybrid vascular graft for sutureless revascularization of the renal arteries during open thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2014;60(3):622-30. PMID:24768367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2014.03.256>.
- Coselli JS, LeMaire SA, Preventza O, et al. Outcomes of 3309 thoracoabdominal aortic aneurysm repairs. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2016;151(5):1323-37. PMID:26898979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtcvs.2015.12.050>.
- Wong DR, Coselli JS, Amerman K, et al. Delayed spinal cord deficits after thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Surg*. 2007;83(4):1345-55. PMID:17383338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2006.11.035>.
- Coselli JS. The use of left heart bypass in the repair of thoracoabdominal aortic aneurysms: current techniques and results. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*. 2003;15(4):326-32. PMID:14710373. [http://dx.doi.org/10.1053/S1043-0679\(03\)00090-X](http://dx.doi.org/10.1053/S1043-0679(03)00090-X).

10. Safi HJ, Miller CC 3rd, Carr C, Iliopoulos DC, Dorsay DA, Baldwin JC. Importance of intercostal artery reattachment during thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg.* 1998;27(1):58-68. PMID:9474083. [http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214\(98\)70292-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0741-5214(98)70292-7).
11. Melissano G, Bertoglio L, Rinaldi E, Leopardi M, Chiesa R. An anatomical review of spinal cord blood supply. *J Cardiovasc Surg (Torino).* 2015;56(5):699-706. PMID:25881616.
12. Cinà CS, Abouzahr L, Arena GO, Laganà A, Devereaux PJ, Farrokhyar F. Cerebrospinal fluid drainage to prevent paraplegia during thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysm surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Vasc Surg.* 2004;40(1):36-44. PMID:15218460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2004.03.017>.
13. Tshomba Y, Leopardi M, Mascia D, et al. Automated pressure-controlled cerebrospinal fluid drainage during open thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg.* 2017;66(1):37-44. PMID: 28216365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2016.11.057>.
14. Koeppel TA, Mess WH, Jacobs MJ. Motor evoked potentials in thoracoabdominal aortic surgery: PRO. *Cardiol Clin.* 2010;28(2):351-60. PMID:20452553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccl.2010.01.013>.
15. Piazza M, Ricotta JJ 2nd. Open surgical repair of thoracoabdominal aortic aneurysms. *Ann Vasc Surg.* 2012;26(4):600-5. PMID:22188939. <http://dx.doi.org/10.1016/j.avsg.2011.11.002>.

Correspondence

Roberto Chiesa
Chair of Vascular Surgery
Vita-Salute San Raffaele University
Ospedale San Raffaele, Via Olgettina 60
20100, Milan, Italy
Phone: +39 02 2643 7165
E-mail: chiesa.roberto@hsr.it

Author information

RC - Full Professor of Vascular Surgery, Vita-Salute San Raffaele University.
GM - Associate Professor of Vascular Surgery, Vita-Salute San Raffaele University.
ER - Senior Staff Surgeon, Department of Vascular Surgery, H. San Raffaele.