

Avaliação Hemodinâmica na Ecocardiografia sob Estresse Físico

Hemodynamic Assessment In Exercise Stress Echocardiography

Andrea de Andrade Vilela,^{1,2} Maria Estefania Otto,^{3,4} Gustavo Nishida,¹ Jorge Eduardo Assef¹

Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia,¹ São Paulo, SP – Brasil

Hospital Israelita Albert Einstein,² São Paulo, SP – Brasil

Instituto de Cardiologia do Distrito Federal (ICDF),³ Brasília, DF – Brasil

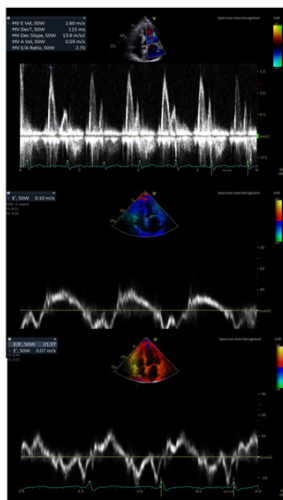
Instituto de Cardiologia e Transplantes do Distrito Federal (ICTDF),⁴ Brasília, DF – Brasil

Figura Central: Avaliação Hemodinâmica na Ecocardiografia sob Estresse Físico



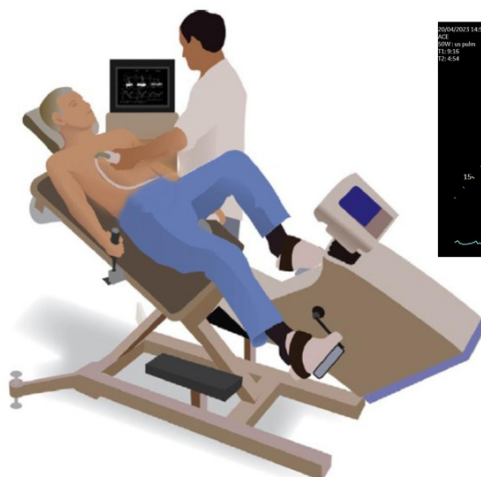
Sinais de Congestão Hemodinâmica

Relação E/e' média > 14 ou Relação E/e' septal > 15



Sinais de Congestão Pulmonar

Presença de linhas B no USP



Arq Bras Cardiol: Imagem cardiovasc. 2024;37(3):e20240049

Resumo

O ecocardiograma com esforço físico em ciclomaca é uma técnica de grande importância pois provê informações da dinâmica das câmaras cardíacas e da hemodinâmica cardiovascular durante o exercício. Este método possibilita a investigação de diversas causas de dispnéia, por meio da

análise das pressões de enchimento diastólico e pressão sistólica da artéria pulmonar, identificando os pacientes que apresentam congestão hemodinâmica ao esforço. Recentemente, com a incorporação do ultrassom de pulmão, foi possível agregar o parâmetro de congestão pulmonar com a identificação do aparecimento de linhas “B” durante o exame, sensibilizando o protocolo.

Entretanto, o ecocardiograma em ciclomaca ainda é pouco utilizado em nosso meio. Provavelmente, essa realidade se deve, em parte, a necessidade de um treinamento apropriado da equipe médica e enfermagem; além do desconhecimento do método entre a comunidade médica que pouco solicita esse exame para avaliação hemodinâmica e pesquisa de dispnéia aos esforços. Dessa forma, o objetivo do presente documento é não apenas difundir o método, mas também descrever de forma prática e didática o passo a passo da avaliação hemodinâmica do ecocardiograma com estresse físico em ciclomaca. Sugerimos protocolo de fácil aplicabilidade e capaz de distinguir entre os achados de pacientes com

Palavras-chave

Estresse Diastólico; Estresse Físico; Ecocardiografia; Hemodinâmica

Correspondência: Andrea de Andrade Vilela •

Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia. Av. Dante Pazzanese, 500.

CEP: 04012-909. São Paulo, SP – Brasil

E-mail: andrea_de_andrade@hotmail.com

Artigo recebido em 30/05/2024; revisado em 03/06/2024;

aceito em 03/06/2024

Editor responsável pela revisão: Marcelo Tavares

DOI: <https://doi.org/10.36660/abcimg.20240049>

hemodinâmica normal daqueles com resposta hemodinâmica inapropriada ao esforço físico. Adicionalmente, dois casos clínicos são relatados com múltiplas imagens e alterações hemodinâmicas, com a descrição da correta interpretação dos achados para melhor compreensão do método e de sua capacidade diagnóstica.

Introdução

Dentre as inúmeras indicações da ecocardiografia sob estresse físico para cardiopatia não isquêmica, a avaliação hemodinâmica tem se destacado como parte fundamental do exame, pois provê informações diagnósticas e prognósticas. Atualmente, um dos principais cenários com importante aplicabilidade da ecocardiografia sob estresse físico é na pesquisa de insuficiência cardíaca com fração de ejeção preservada (ICFEP), cuja queixa principal é a dispneia ao esforço. A avaliação hemodinâmica faz parte do protocolo do exame, sendo avaliada a presença ou não dos sinais de congestão hemodinâmica e/ou congestão pulmonar ao esforço físico.

A ecocardiografia com estresse físico em cicloergômetro (ECOCICLO) tem vantagem sobre a ecocardiografia com estresse em esteira ergométrica. A ECOCICLO possibilita a detecção em tempo real do aumento patológico da relação E/e' , que sugere congestão hemodinâmica, bem como o momento do aparecimento de linhas B no ultrassom pulmonar (USP), que sugere congestão pulmonar.

No presente estudo, iremos descrever os achados ecocardiográficos de congestão hemodinâmica, os achados ultrassonográficos de congestão pulmonar e o passo a passo da avaliação hemodinâmica com ECOCICLO. Também objetivamos sugerir um protocolo de exame para avaliação de dispneia ao esforço por meio de casos clínicos.

Não abordaremos a avaliação hemodinâmica na doença cardíaca valvar.

Sinais ecocardiográficos de congestão hemodinâmica no ECOCICLO

As pressões de enchimento do ventrículo esquerdo (VE) podem ser estimadas por meio da razão entre o pico de velocidade da onda E do fluxo diastólico da valva mitral (estimada via Doppler pulsátil) e a velocidade da onda e' do anel mitral (estimada via Doppler tecidual).^{1,2} Durante o esforço físico, normalmente, as velocidades das ondas E e e' aumentam proporcionalmente à medida que o gradiente transmitral se eleva (Figura 1). Em corações saudáveis, a despeito da redução do período diastólico (decorrente do aumento da frequência cardíaca no exercício), as pressões de enchimento diastólico permanecem inalteradas, ou com mínimo aumento. Isso se deve ao aumento da sucção do VE no início da diástole, possibilitando um esvaziamento atrial mais eficiente e o aumento do volume sistólico.³ Já nos pacientes com ICFEP, há elevação da velocidade da onda E e manutenção da velocidade da onda e', determinando assim um pico da razão E/e' . Nesses pacientes, há aumento da pós carga com "alentecimento" do relaxamento miocárdico associado a menor sucção ventricular durante o esforço físico; além disso, há aumento da frequência cardíaca, que, na vigência de um miocárdio menos complacente, gera elevação da pressão diastólica do VE e da pressão do átrio esquerdo (AE), resultando assim no aumento da pressão capilar pulmonar (PCP) com congestão pulmonar e dispneia (Figura 2).⁴

O exame de estresse diastólico refere-se ao uso de ecocardiografia com Doppler para detectar reserva funcional diastólica do VE reduzida e o aumento resultante nas pressões

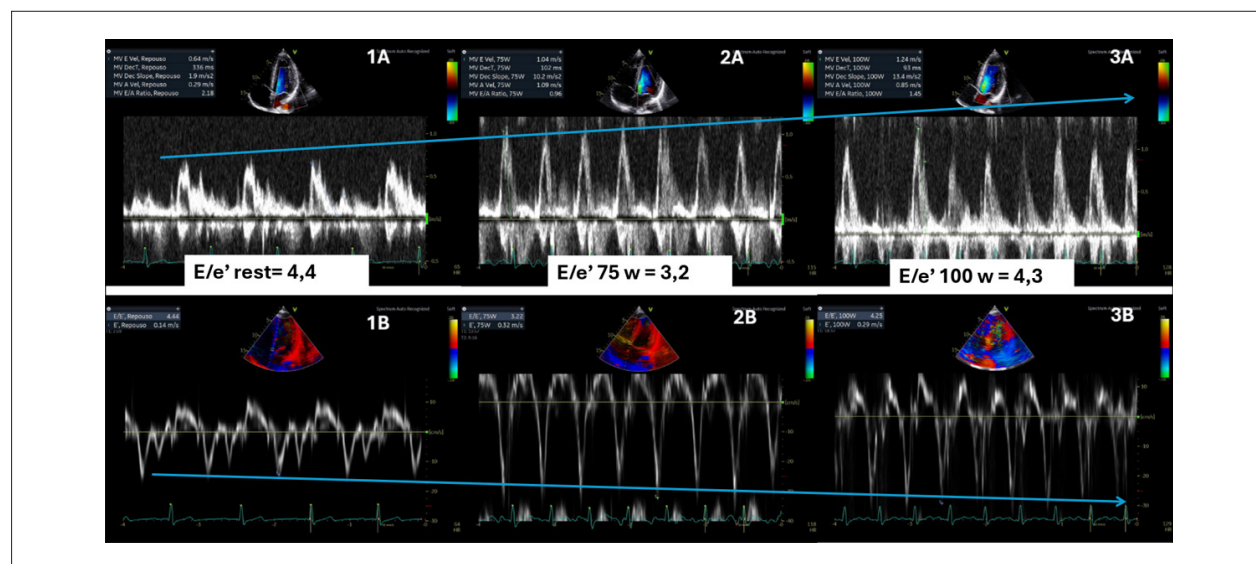


Figura 1 – Aumento as velocidades de E e e' em indivíduos com resposta normal das pressões de enchimento ao esforço (fonte: banco de imagens do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia [IDPC]). E: velocidade do influxo mitral no período de esvaziamento rápido; e': velocidade do Doppler tecidual no período de esvaziamento rápido.

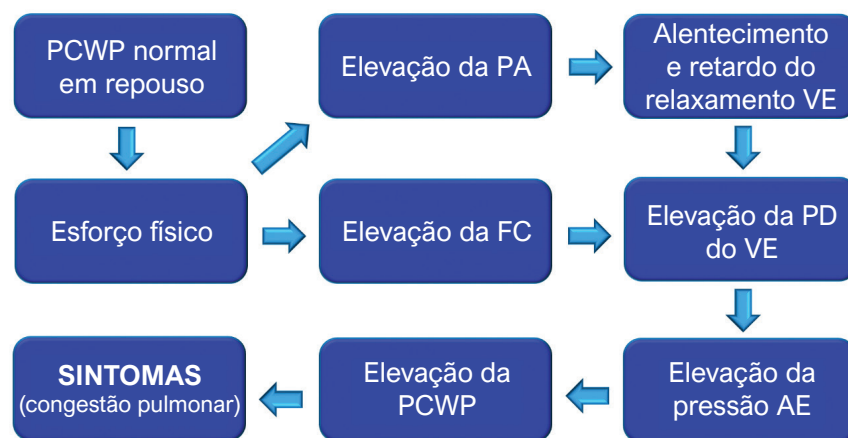


Figura 2 – Algoritmo da fisiopatologia do surgimento de congestão ao estresse físico (fonte: acervo pessoal do autor Assef JE). PCWP: pressão capilar pulmonar em cunha; PA: pressão arterial; VE: ventrículo esquerdo; FC: frequência cardíaca; PD: pressão diastólica; AE: átrio esquerdo.

de enchimento do VE durante o esforço físico em pacientes com dispneia de origem indeterminada ou disfunção diastólica subclínica (achado frequente na cardiomiopatia diabética, na obesidade e na hipertensão).⁵⁻⁸ Estudos mostraram que a ecocardiografia com Doppler é uma técnica viável que permite a detecção do aumento patológico das pressões de enchimento diastólico esforço induzido de forma não invasiva (Tabela 1), sendo capaz de distinguir entre dispneia de origem cardíaca e não cardíaca.⁴

Sinais ultrassonográficos de congestão pulmonar no ECOCICLO

O USP foi introduzido nas unidades de terapia intensiva e departamentos de emergência há mais de 20 anos, principalmente como uma ferramenta de avaliação para pacientes com dispneia aguda.⁹⁻¹¹ Na última década, a comunidade cardiológica reconheceu o potencial do USP na detecção de congestão pulmonar e expandiu seu uso para o diagnóstico e manejo de pacientes com insuficiência cardíaca.¹²

O USP é um exame versátil, de alta sensibilidade para detectar desaeração pulmonar devido ao aumento da água extravascular no interstício pulmonar. Seu uso integrado à ecocardiografia possibilita uma análise completa para melhor manejo do paciente com queixa de dispneia ao esforço na suspeita de insuficiência cardíaca.^{13,14}

Num pulmão totalmente aerado, a única estrutura anatômica que pode ser visualizada é a pleura, que aparece como uma superfície horizontal lisa e hiperecótica, uma linha que se move em sincronia com a respiração. Esta linha é chamada linha pleural e seu movimento é o deslizamento pulmonar, o que possibilita a avaliação da excursão pulmonar durante a ventilação. O padrão ultrassonográfico do pulmão aerado também inclui linhas horizontais, paralelas e hiperecóticas que podem ser vistas em intervalos regulares a partir da linha pleural (linhas A, Figura 3).

Quando o conteúdo de ar nos pulmões diminui e a densidade pulmonar aumenta, surgem artefatos de reverberação vertical (linhas B, Figura 3). As linhas B se originam da linha pleural e se movem em sincronia com a respiração, têm formato de laser e se estendem em direção à parte inferior do setor da imagem ultrassonográfica. Essas linhas estão presentes em pacientes com insuficiência cardíaca (edema pulmonar cardiogênico) e em doenças pulmonares (edema pulmonar não cardiogênico).¹³ Otto e Andrioli descrevem em detalhes a técnica de obtenção de imagens e interpretação do USP para congestão.¹⁵

Ao integrar o USP à ecocardiografia com estresse, pode-se realizar uma abordagem simplificada, avaliando quatro zonas, colocando o transdutor setorial no terceiro espaço intercostal ao longo das linhas axilares anterior e média.^{16,17}

Esta simplificação no protocolo mostrou uma boa correlação entre praticidade e acurácia quando realizada no repouso, no pico do esforço e logo após a finalização do esforço.¹⁶

Em pacientes com ICFC, o aparecimento de linhas B ao USP ocorre por congestão pulmonar e se correlaciona com a piora da função diastólica induzida pelo esforço físico, avaliada pelo pico da relação E/e' e pelos valores reduzidos do *strain rate* global no final da diástole.¹⁸ Com base em estudo hemodinâmico invasivo (por meio de micromanômetros de alta fidelidade), a congestão pulmonar aguda durante o estresse físico ocorre tanto pelo aumento da pressão hidrostática no capilar pulmonar quanto pela hipertensão venosa sistêmica, que pode ser avaliada pelo desacoplamento entre a função do ventrículo direito e a pressão da artéria pulmonar (VD-AP).¹⁹ A avaliação do desacoplamento VD-AP durante o ECOCICLO, calculado pela razão do deslocamento sistólico do anel tricúspide (TAPSE) pela velocidade máxima do refluxo tricúspide (VTri), é um parâmetro que pode auxiliar na identificação da causa da congestão pulmonar ao esforço com relação E/e' normal, tratando-se provavelmente de hipertensão venosa sistêmica, muitas vezes associada a doença pulmonar. De

Tabela 1 – Estudos que validaram o ecocardiografia de estresse para avaliação de dispneia de origem indeterminada, correlacionando o parâmetro E/e’ com as medidas invasivas das pressões de enchimento diastólico (adaptado de Ha et al.⁴)

	Burgess et al., 2006 ⁷	Talreja et al., 2007 ⁸	Obokata et al., 2017 ⁹	Hong et al., 2018 ¹⁰
Desenho do estudo	Prospectivo	Prospectivo	Prospectivo	Prospectivo
Casuística	37	12	74	21
Modo de esforço	Bicicleta supina	Bicicleta supina	Bicicleta supina	Bicicleta supina
Medida invasiva para avaliar a pressão de enchimento do VE	PDVE média	PCP	PCP	Varição da PDVE
Parâmetro não invasivo para avaliar a pressão de enchimento do VE	E/e’ média	E/e’ média	E/e’ média	E/e’ média
Sensibilidade/especificidade	73/96	89/100	-----	----
Coefficiente de correlação	0,59	-----	0,57	0,51

PDVE: pressão diastólica final do VE; PCP: pressão capilar pulmonar

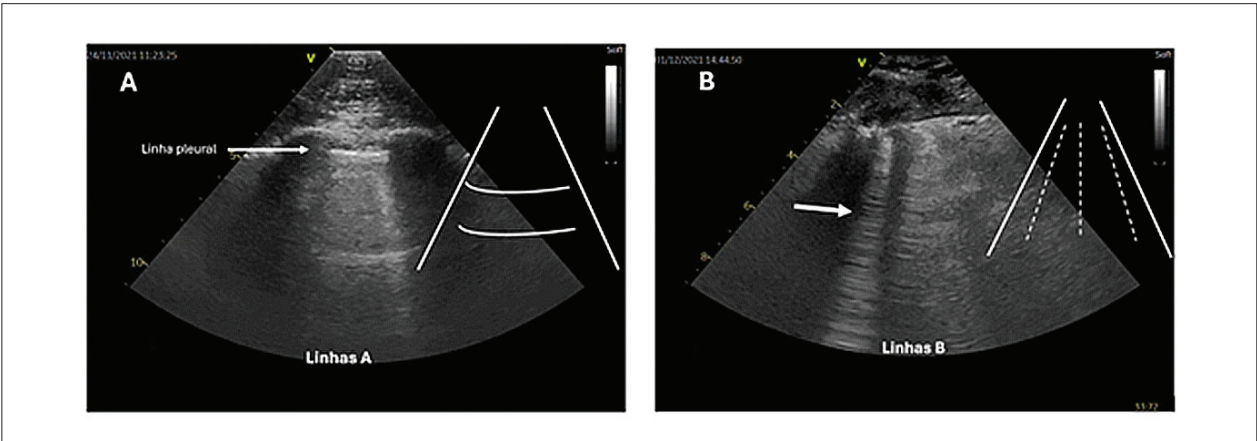


Figura 3 – A) Imagem de ultrassom pulmonar com linhas A. B) Imagem de ultrassom pulmonar com linhas B (seta) (fonte: acervo pessoal do autor Otto ME)

acordo com a literatura, valores inferiores a 0,36 mm.cm/s correlacionam-se com maior desacoplamento VD-AP em pacientes com hipertensão pulmonar (HP) pós-capilar,²⁰ e valores inferiores a 0,31 mm.cm/s estão associados a maior desacoplamento VD-AP nos pacientes com HPpré-capilar, devido à doença pulmonar idiopática e tromboembólica.²¹

O surgimento de linhas B durante o ECOCICLO, mesmo que apenas uma por campo avaliado, deve ser valorizado. O número de linhas B no pico do exercício tem correlação direta com reinternação e morte por insuficiência cardíaca em pacientes com fração de ejeção preservada ou reduzida.²²

Protocolo do exame de estresse físico

A resposta normal esperada durante o estresse físico em esteira ou bicicleta é um aumento da frequência cardíaca de duas a três vezes, maior contratilidade de três a quatro vezes, elevação da pressão arterial sistólica em pelo menos 50% e queda da resistência vascular sistêmica, com manutenção ou redução da pressão arterial diastólica.²³ Em relação aos volumes cardíacos, inicialmente ocorre um aumento do

volume diastólico final devido ao aumento no retorno venoso, o que resulta em um aumento do volume sistólico decorrente do mecanismo de *Frank-Starling* num primeiro momento e do aumento da frequência cardíaca posteriormente.

Quando o objetivo do exame é a avaliação hemodinâmica das pressões de enchimento durante o esforço, a bicicleta supina é mais sensível em detectar o aumento dessas pressões em comparação com a bicicleta vertical, pois os volumes diastólicos e a pressão arterial média são maiores na posição supina devido ao aumento do retorno venoso. Dessa forma, a posição supina contribui para uma maior tensão na parede, um aumento na demanda miocárdica de oxigênio e nas pressões de enchimento em comparação com um teste de bicicleta vertical.^{23,24}

Frequentemente, o perfil dos pacientes submetidos à avaliação hemodinâmica no cicloergômetro é complexo e acompanhado de múltiplas comorbidades. A investigação da dispneia engloba diversas patologias, como cardiomiopatia isquêmica, cardiomiopatia hipertrófica, disfunção diastólica e doença pulmonar. Por tal motivo, o protocolo de avaliação deve incluir todas as informações necessárias para os mais

Artigo de Revisão

diversos diagnósticos. Na Figura 4, temos o exemplo do protocolo que adotamos em nosso serviço. Nas projeções iniciais, que correspondem ao exame basal, é necessário que dados de aumento das pressões de enchimento e congestão pulmonar sejam obtidos: o fluxo pulsátil da valva mitral para estimativa da velocidade da onda E, o Doppler tecidual septal e lateral do anel mitral para estimativa da onda e', o Doppler contínuo do refluxo tricúspide para estimativa da velocidade de pico, o USP para avaliação da congestão pulmonar e, nas últimas projeções, pelo menos três incidências do VE para analisar a contratilidade segmentar dos 17 segmentos e pesquisar isquemia. Na Figura Central, temos a imagem da disposição do cicloergômetro/paciente e aparelho de ecocardiografia, além de imagens com os critérios definidores de congestão hemodinâmica e congestão pulmonar.

Interpretação dos dados hemodinâmicos

Para uma correta interpretação dos dados hemodinâmicos durante o esforço físico, é importante considerar a carga de trabalho (gerada em *Watts* pelo cálculo no módulo de ergometria acoplado à maca ergométrica) e a idade do paciente, por haver um aumento da pressão sistólica da artéria pulmonar (PSAP) com o avançar da idade, tanto em repouso quanto no exercício, achado também verificado em atletas²⁴. Em pacientes com idade ≥ 70 anos, o aumento da pressão sistólica pulmonar está associado à diminuição do fluxo transpulmonar e ao aumento da pressão de pulso sistêmica, explicado pelo aumento da rigidez arterial no idoso.²⁴ Um maior volume sistólico em comparação aos indivíduos normais é o que justifica o aumento da PSAP durante o esforço em atletas.²⁵

Em indivíduos saudáveis, o exercício aumenta o débito cardíaco e reduz a resistência vascular pulmonar (RVP). Um valor de PSAP < 43 mmHg durante o exercício é considerado normal.²⁶ Do ponto de vista patológico, baseado na equação fundamental do fluxo ($\text{Fluxo [F]} = \text{variação de pressão } [\Delta P] / \text{resistência [R]}$), o aumento anormal da pressão da artéria pulmonar durante o exercício pode ser atribuído ao débito cardíaco supranormal (por exemplo, em atletas) ou a um

aumento da resistência devido à capacidade limitada do leito vascular pulmonar (como ocorre na doença pulmonar obstrutiva crônica ou cardiopatia congênita). Neste contexto, a relação entre ΔP (estimada pela velocidade da insuficiência tricúspide [IT]) e o fluxo (estimado pela integral da velocidade pelo tempo do fluxo [VTI] na via de saída do ventrículo direito [VSVD]) pode ajudar a diferenciar quando o aumento da pressão está relacionado ao aumento do fluxo ou da resistência, sendo esta última calculada pela fórmula: $(\text{velocidade máxima da IT} \div \text{VTI VSVD}) \times 10 + 0,16$.²⁷ O cálculo da RVP também auxilia na identificação dos pacientes com HP pós-capilar ($\text{RVP} < 3 \text{ UW}$) e pacientes com HP pré-capilar ou HP mista ($\text{RVP} > 3 \text{ UW}$).

Shim et al.²⁸ seguiram 498 pacientes submetidos à ecocardiografia com estresse diastólico por 41 meses e observaram que os pacientes que apresentaram HP induzida pelo esforço tiveram pior prognóstico. Nos pacientes com elevação patológica da relação E/e' e HP induzida pelo esforço, a evolução foi significativamente desfavorável em comparação ao grupo de pacientes com estresse diastólico normal e ao grupo que apresentou apenas HP induzida pelo esforço.²⁸

Relatos dos Casos Clínicos

Caso Clínico 1: Paciente do gênero feminino, 45 anos, com diagnóstico de cardiomiopatia hipertrófica não obstrutiva, apresenta queixa de fadiga e dispneia ao esforço moderado. O objetivo do exame solicitado era a investigação do gradiente intraventricular durante o esforço físico (exame de repouso: Figura 5).

A paciente foi submetida ao ECOCICLO e foram avaliados os seguintes dados hemodinâmicos: relação E/e', pico de VTri, USP e gradiente na via de saída do VE (Figura 6).

Conforme observado na análise do exame descrito na Figura 6, a paciente não apresentava obstrução na via de saída do VE durante o esforço. No entanto, houve elevação patológica da relação E/e' durante o esforço com baixa carga (relação E/e' = 15,2 com 25W), associada à HP e ao aparecimento de linhas B no USP, compatível com ICfEP. Nesse caso, a paciente apresentou congestão hemodinâmica e pulmonar ao esforço físico. É

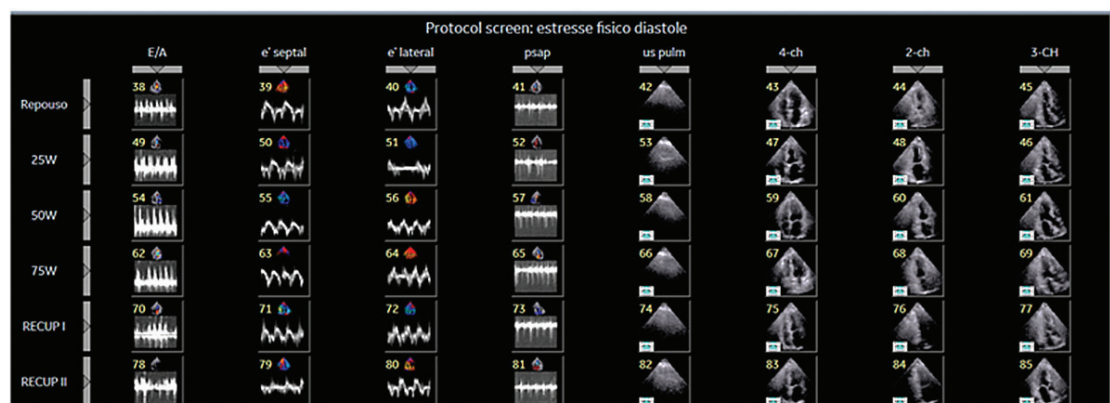


Figura 4 – Exemplo de protocolo para maca ergométrica com avaliação de pressões de enchimento, congestão pulmonar e análise da contração segmentar (fonte: banco de imagens do IDPC).

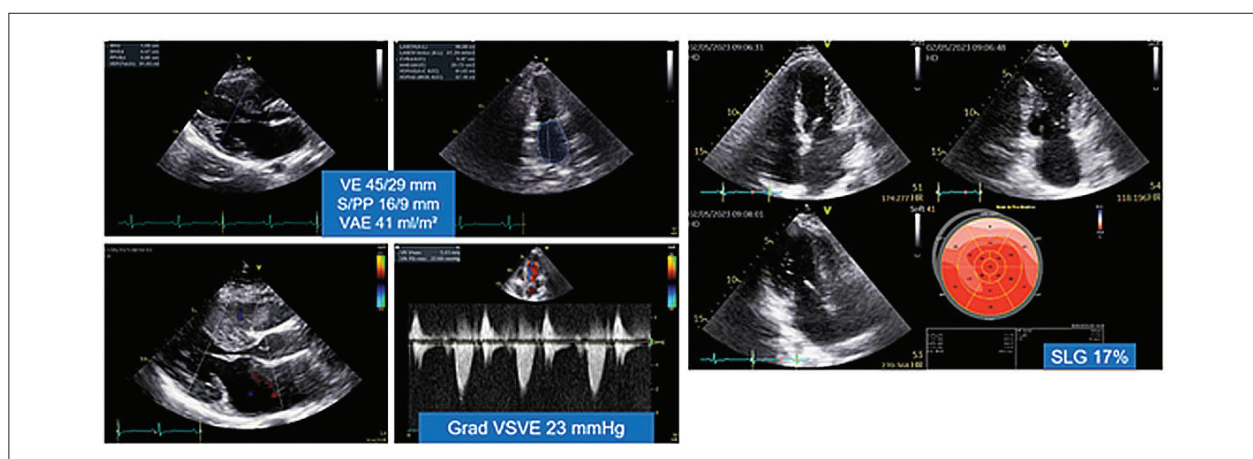


Figura 5 – Avaliação em repouso de paciente com cardiomiopatia hipertrófica com predomínio septal. For Review Only Imagens a esquerda: gradiente em repouso e à direita avaliação do Strain Global Longitudinal com redução na parede septal. (fonte: banco de imagens do IDPC).

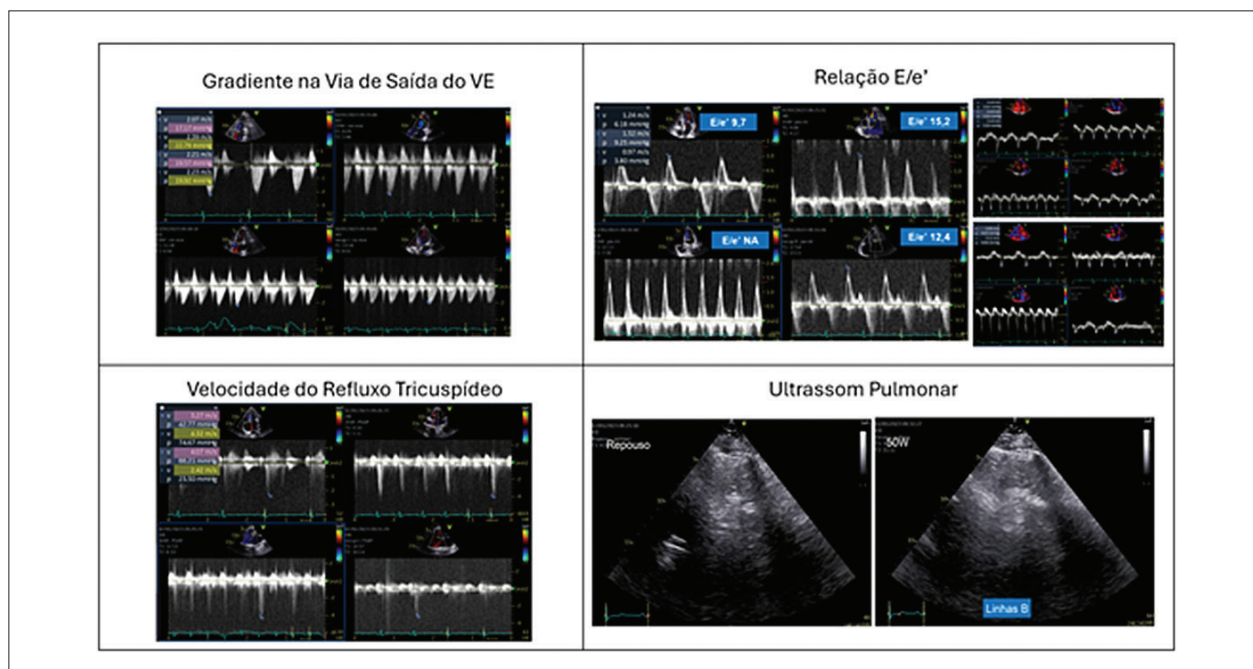


Figura 6 – Avaliação durante o esforço de paciente com cardiomiopatia hipertrófica com predomínio septal. Imagens superior a esquerda: gradientes medidos na via de saída do VE no repouso: 17,1 mmHg; com 25W: 22,8 mmHg; com 50W: 19,6 mmHg e na recuperação: 19,9 mmHg, respectivamente. Imagens superior a direita: relação E/e' em repouso: 9,7; E/e' 25W: 15,2; E/e' 50W: Não Avaliado por fusão das ondas E e A e E/e' recuperação: 12,4. Imagens inferior a esquerda: velocidade de pico do refluxo tricúspideo em repouso: 3,27 m/s; com 25W: 4,32 mmHg; com 50W: 4,07 mmHg e na recuperação: 2,32 mmHg. Imagens inferior a direita: análise do USP em repouso e com 50W. (fonte: banco de imagens do IDPC).

interessante ressaltar que, na potência de 50W, observamos o fenômeno de fusão das ondas E e A a uma frequência cardíaca de 100 bpm, um achado habitual que impossibilita a avaliação da relação E/e'. Entretanto, a aquisição do Doppler pulsátil do fluxo mitral na recuperação imediata, quando há a separação das ondas E e A, permite avaliar com precisão as pressões de enchimento modificadas pelo esforço físico.

Caso Clínico 2: Paciente de 62 anos, sexo masculino, hipertenso, diabético, ex-tabagista, com queixa de dispnéia

ao esforço moderado. Na avaliação clínica, apresentava obesidade grau I. Adicionalmente, o nível de peptídeo natriurético cerebral tipo B (BNP) estava normal, estimado em 65 pg/ml. Foi realizado ecocardiografia transtorácica (Figura 7) e ECOCICLO (Figura 8).

Contrapondo o caso clínico 1, este paciente não apresentou aumento das pressões de enchimento durante o esforço (relação E/e' normal). Entretanto, com 75W, apresentou dispnéia com discreta queda na saturação de O₂ (inicialmente

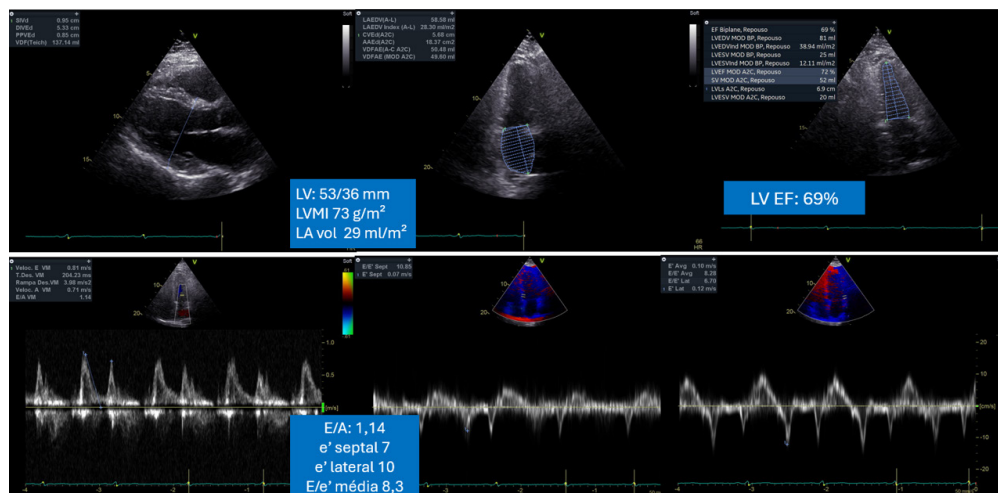


Figura 7 – Ecocardiografia de repouso de paciente hipertenso, diabético, ex-tabagista com queixa de dispnéia aos esforços moderados (fonte: banco de imagens do IDPC).

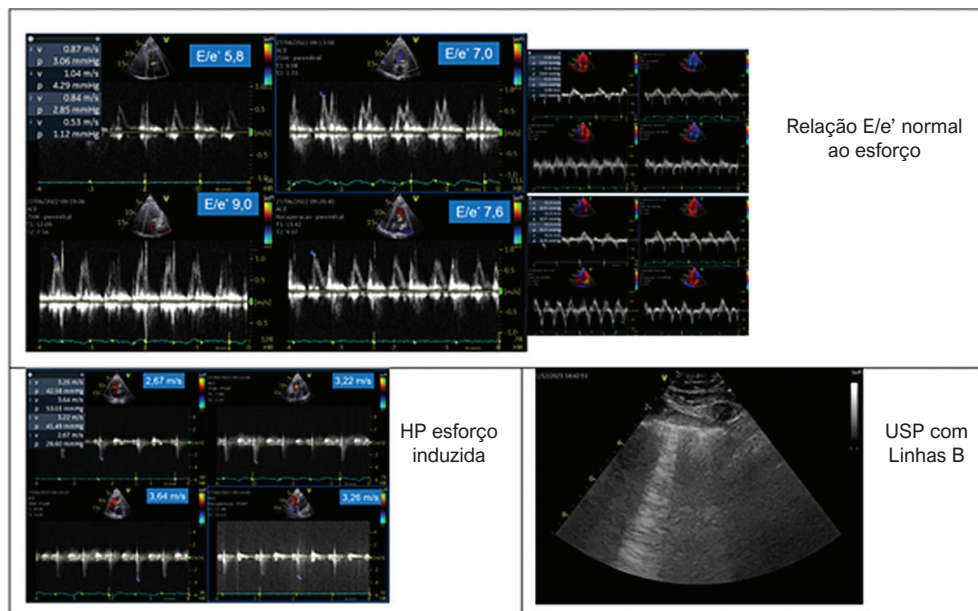


Figura 8 – Avaliação durante o esforço de paciente hipertenso, diabético, ex-tabagista com queixa de dispnéia ao esforço moderado. Imagens na metade superior: Relação E/e' normal ao esforço. Imagens inferior a esquerda: velocidade de pico do refluxo tricúspideo em repouso: 2,67 m/s; com 25W: 3,22 m/s; com 75W: 3,64 m/s e na recuperação: 3,26 m/s; respectivamente. Imagens inferior a direita: análise do USG com 75W (fonte: banco de imagens do IDPC).

saturava 98% em ar ambiente, caindo para 93% com 75W de potência), associada à congestão pulmonar. Baseado nesses achados, foi realizada a avaliação da relação TAPSE/VTri, a qual se mostrou reduzida (Figura 9). A conclusão dessas alterações de saturação e função ventricular direita foi que a congestão pulmonar ocorreu provavelmente por hipertensão venosa sistêmica associada ao desacoplamento ventrículo-arterial. Adicionalmente, o paciente apresentava histórico de tabagismo, com possível

doença pulmonar obstrutiva crônica, condições que corroboram os achados de queda de saturação e disfunção do ventrículo direito “oculta”.

Conclusão

A ECOCICLO permite uma avaliação detalhada de diversos parâmetros que vão muito além da contração segmentar do VE. Este método possibilita a investigação da causa de dispnéia, descrevendo o comportamento hemodinâmico ventricular

Referências

1. Nagueh SF, Middleton KJ, Kopelen HA, Zoghbi WA, Quiñones MA. Doppler Tissue Imaging: A Noninvasive Technique for Evaluation of Left Ventricular Relaxation and Estimation of Filling Pressures. *J Am Coll Cardiol*. 1997;30(6):1527-33. doi: 10.1016/s0735-1097(97)00344-6.
2. Ommen SR, Nishimura RA, Appleton CP, Miller FA, Oh JK, Redfield MM, et al. Clinical Utility of Doppler Echocardiography and Tissue Doppler Imaging in the Estimation of Left Ventricular Filling Pressures: A Comparative Simultaneous Doppler-catheterization Study. *Circulation*. 2000;102(15):1788-94. doi: 10.1161/01.cir.102.15.1788.
3. Udelson JE, Bacharach SL, Cannon RO 3rd, Bonow RO. Minimum Left Ventricular Pressure During Beta-adrenergic Stimulation in Human Subjects. Evidence for Elastic Recoil and Diastolic "Suction" in the Normal Heart. *Circulation*. 1990;82(4):1174-82. doi: 10.1161/01.cir.82.4.1174.
4. Ha JW, Andersen OS, Smiseth OA. Diastolic Stress Test: Invasive and Noninvasive Testing. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020;13(1):272-82. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.01.037.
5. Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, Byrd BF 3rd, Dokainish H, Edvardsen T, et al. Recommendations for the Evaluation of Left Ventricular Diastolic Function by Echocardiography: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr*. 2016;29(4):277-314. doi: 10.1016/j.echo.2016.01.011.
6. Ha JW, Oh JK, Pellikka PA, Ommen SR, Stussy VL, Bailey KR, et al. Diastolic Stress Echocardiography: A Novel Noninvasive Diagnostic Test for Diastolic Dysfunction Using Supine Bicycle Exercise Doppler Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2005;18(1):63-8. doi: 10.1016/j.echo.2004.08.033.
7. Burgess MI, Jenkins C, Sharman JE, Marwick TH. Diastolic Stress Echocardiography: Hemodynamic Validation and Clinical Significance of Estimation of Ventricular Filling Pressure with Exercise. *J Am Coll Cardiol*. 2006;47(9):1891-900. doi: 10.1016/j.jacc.2006.02.042.
8. Talreja DR, Nishimura RA, Oh JK. Estimation of Left Ventricular Filling Pressure with Exercise by Doppler Echocardiography in Patients with Normal Systolic Function: A Simultaneous Echocardiographic-cardiac Catheterization Study. *J Am Soc Echocardiogr*. 2007;20(5):477-9. doi: 10.1016/j.echo.2006.10.005.
9. Obokata M, Kane GC, Reddy YN, Olson TP, Melenovsky V, Borlaug BA. Role of Diastolic Stress Testing in the Evaluation for Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: A Simultaneous Invasive-Echocardiographic Study. *Circulation*. 2017;135(9):825-38. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.116.024822.
10. Hong SJ, Shim CY, Kim D, Cho JJ, Hong GR, Moon SH, et al. Dynamic Change in Left Ventricular Apical Back Rotation: A Marker of Diastolic Suction with Exercise. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2018;19(1):12-9. doi: 10.1093/ehjci/ehj241.
11. Lichtenstein D, Mezière G. A Lung Ultrasound Sign Allowing Bedside Distinction Between Pulmonary Edema and COPD: The Comet-tail Artifact. *Intensive Care Med*. 1998;24(12):1331-4. doi: 10.1007/s001340050771.
12. Picano E, Frassi F, Agricola E, Gligorova S, Gargani L, Mottola G. Ultrasound Lung Comets: A Clinically Useful Sign of Extravascular Lung Water. *J Am Soc Echocardiogr*. 2006;19(3):356-63. doi: 10.1016/j.echo.2005.05.019.
13. Gargani L, Gierd N, Platz E, Pellicori P, Stankovic I, Palazzuoli A, et al. Lung Ultrasound in Acute and Chronic Heart Failure: A Clinical Consensus Statement of the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI). *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2023;24(12):1569-82. doi: 10.1093/ehjci/jead169.
14. Ciampi Q, Zagatina A, Cortigiani L, Wierzbowska-Drabik K, Kasprzak JD, Haberk M, et al. Prognostic Value of Stress Echocardiography Assessed by the ABCDE Protocol. *Eur Heart J*. 2021;42(37):3869-78. doi: 10.1093/eurheartj/ehab493.
15. Otto MEB, Esmanhoto VA. Como Eu Faço Ultrassom de Pulmão para Avaliar Congestão. *Arq Bras Cardiol Imagem Cardiovasc*. 2022;35(3):22. doi: 10.47593/2675-312X/20223503ecom22.
16. Scali MC, Zagatina A, Simova I, Zhuravskaya N, Ciampi Q, Paterni M, et al. B-lines with Lung Ultrasound: The Optimal Scan Technique at Rest and During Stress. *Ultrasound Med Biol*. 2017;43(11):2558-66. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.07.007.
17. Merli E, Ciampi Q, Scali MC, Zagatina A, Merlo PM, Arbucci R, et al. Pulmonary Congestion During Exercise Stress Echocardiography in Ischemic and Heart Failure Patients. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2022;15(5):e013558. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.121.013558.
18. Simonovic D, Coiro S, Deljanin-Ilic M, Kobayashi M, Carluccio E, Gierd N, et al. Exercise-induced B-lines in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction Occur Along with Diastolic Function Worsening. *ESC Heart Fail*. 2021;8(6):5068-80. doi: 10.1002/ehf2.13575.
19. Reddy YNV, Obokata M, Wiley B, Koeppe KE, Jorgenson CC, Egbe A, et al. The Haemodynamic Basis of Lung Congestion During Exercise in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Eur Heart J*. 2019;40(45):3721-30. doi: 10.1093/eurheartj/ehz713.
20. Guazzi M, Naeije R, Arena R, Corrà U, Ghio S, Forfia P, et al. Echocardiography of Right Ventriculoarterial Coupling Combined with Cardiopulmonary Exercise Testing to Predict Outcome in Heart Failure. *Chest*. 2015;148(1):226-34. doi: 10.1378/chest.14-2065.
21. Tello K, Wan J, Dalmer A, Vanderpool R, Ghofrani HA, Naeije R, et al. Validation of the Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion/Systolic Pulmonary Artery Pressure Ratio for the Assessment of Right Ventricular-Arterial Coupling in Severe Pulmonary Hypertension. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2019;12(9):e009047. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.119.009047.
22. Scali MC, Zagatina A, Simova I, Zhuravskaya N, Ciampi Q, Paterni M, et al. B-lines with Lung Ultrasound: The Optimal Scan Technique at Rest and During Stress. *Ultrasound Med Biol*. 2017;43(11):2558-66. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.07.007.
23. Poliner LR, Dehmer GJ, Lewis SE, Parkey RW, Blomqvist CG, Willerson JT. Left Ventricular Performance in Normal Subjects: A Comparison of the Responses to Exercise in the Upright and Supine Positions. *Circulation*. 1980;62(3):528-34. doi: 10.1161/01.cir.62.3.528.
24. Kane GC, Sachdev A, Villarraga HR, Ammash NM, Oh JK, McGoon MD, et al. Impact of Age on Pulmonary Artery Systolic Pressures at Rest and with Exercise. *Echo Res Pract*. 2016;3(2):53-61. doi: 10.1530/ERP-16-0006.
25. Bosson E, Rubenfire M, Bach DS, Ricciardi M, Armstrong WF. Range of Tricuspid Regurgitation Velocity at Rest and During Exercise in Normal Adult Men: Implications for the Diagnosis of Pulmonary Hypertension. *J Am Coll Cardiol*. 1999;33(6):1662-6. doi: 10.1016/s0735-1097(99)00055-8.
26. Grünig E, Weissmann S, Ehlken N, Fijalkowska A, Fischer C, Fourme T, et al. Stress Doppler Echocardiography in Relatives of Patients with Idiopathic and Familial Pulmonary Arterial Hypertension: Results of a Multicenter European Analysis of Pulmonary Artery Pressure Response to Exercise and Hypoxia. *Circulation*. 2009;119(13):1747-57. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.108.800938.
27. Abbas AE, Fortuin FD, Schiller NB, Appleton CP, Moreno CA, Lester SJ. A Simple Method for Noninvasive Estimation of Pulmonary Vascular Resistance. *J Am Coll Cardiol*. 2003;41(6):1021-7. doi: 10.1016/s0735-1097(02)02973-x.
28. Shim CY, Kim SA, Choi D, Yang WI, Kim JM, Moon SH, et al. Clinical Outcomes of Exercise-induced Pulmonary Hypertension in Subjects with Preserved Left Ventricular Ejection Fraction: Implication of an Increase in Left Ventricular Filling Pressure During Exercise. *Heart*. 2011;97(17):1417-24. doi: 10.1136/hrt.2010.220467.

