

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE MEDICINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
PNEUMOLÓGICAS

Dissertação de Mestrado

**Modelo de implantação transtorácica de eletrodo guiado
por Ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma de
suínos**

Aline Spader Casagrande

Porto Alegre 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE MEDICINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
PNEUMOLÓGICAS

**Modelo de implantação transtorácica de eletrodo guiado
por Ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma de
suínos**

Aline Spader Casagrande

Dissertação apresentada ao
programa de Pós-Graduação em Ciências
Pneumológicas, Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como requisito
parcial para título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano
Feijó Andrade

Porto Alegre 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Spader Casagrande , Aline
Modelo de implantação transtorácica de eletrodo
guiado por Ultrassonografia para estimulação elétrica
do diafragma de suínos / Aline Spader Casagrande . --
2021.
57 f.
Orientador: Cristiano Feijó Andrade.

Coorientador: Rodrigo Ghedini Gheller.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Medicina, Programa de
Pós-Graduação em Ciências Pneumológicas, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. estimulação elétrica diafragmática . 2.
marcapasso frênico . 3. diafragma. I. Feijó Andrade,
Cristiano, orient. II. Ghedini Gheller, Rodrigo,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DEDICATÓRIA

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis (José de Alencar).

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cristiano Feijó Andrade, pela orientação e pela motivação ao longo desta pós-graduação. Obrigada pelo conhecimento transmitido.

Ao colega Rodrigo Ghedini que participou deste projeto com muito entusiasmo. Foste indispensável.

Aos muitos professores que marcaram meu caminho e que tiveram papel essencial na minha vida e na minha formação, foram tantos que me sinto privilegiada.

À minha família e aos meus amigos, que vibram comigo de forma singular a cada passo dado e a cada nova conquista. Dar orgulho a vocês é uma das coisas que me mantém em movimento. Obrigada pela paciência e por relevar os tantos momentos de indisponibilidade.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	4
LISTA DE FIGURAS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO	8
REFERENCIAL TEÓRICO	10
JUSTIFICATIVA	27
OBJETIVOS	28
REFERÊNCIAS	29
ARTIGO CIENTÍFICO	ERROR
CONCLUSÃO	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
ANEXOS E APENDICE	49

LISTA DE ABREVIATURAS

MPD - Marcapasso diafragmático

MPF-IT - Marcapasso frênico intratorácico

MPD-IP - Marcapasso diafragmático intraperitoneal

DDIV - disfunção diafragmática induzida pelo ventilador FEdi - Fração de espessamento diafragmático

CRF - capacidade residual funcional

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão esquemática da zona de aposição diafragmática	10
Figura 2 - Anatomia do nervo frênico	12
Figura 3 - Medida da excursão diafragmática por ultrassonografia	21
Figura 4 - Curva sinusoidal no modo M durante a respiração	22
Figura 5 - Imagem ultrassonográfica do diafragma na zona de aposição	24
Figura 6 - Espessura do diafragma na zona de aposição no modo B	24
Figura 7 - Espessura do diafragma na zona de aposição no modo M	25

RESUMO

Objetivo: Desenvolver um método de implantação transtorácica de eletrodos guiada por ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma em suínos.

Materiais e Métodos: Foram utilizados 5 suínos mantidos em ventilação mecânica seguindo protocolo anestésico padronizado, submetidos a exploração da base do tórax com ultrassonografia com visualização da zona de aposição diafragmática e implantação transtorácica de eletrodo guiado por ultrassonografia. Foi realizado um protocolo de estimulação elétrica do diafragma através do eletrodo implantado, e registrada a amplitude da movimentação diafragmática e a espessura do diafragma durante a inspiração e expiração. A fração de espessamento diafragmático foi calculada com auxílio do ultrassom, avaliando o efeito do eletroestimulo em comparação a ventilação passiva sem bloqueio neuromuscular.

Resultados: Não foram observadas complicações importantes no procedimento de implantação do eletrodo. A mediana de amplitude da movimentação diafragmática durante ventilação assistida incluindo ambas as hemicúpulas diafragmáticas foi de 1,025 cm (0,670 - 1,500 cm) e com eletroestimulo, 1,330 cm (0,750 – 1,850 cm), sem diferença estatística entre os grupos, $P = 0,260$. A fração de espessamento diafragmático (FED) variou entre 20,07 % a 56,18% (mediana 31,87%) durante a ventilação passiva e 23,81 a 105,01 % (mediana 59,57%) durante a eletroestimulação, $P = 0,022$.

Conclusão: A estimulação elétrica do diafragma com eletrodos implantados de forma transtorácica é factível e reproduzível. O desenvolvimento deste modelo pode tornar a estimulação elétrica diafragmática possível de forma minimamente invasiva e uma alternativa eficaz para evitar a atrofia de desuso em pacientes em ventilação mecânica.

Palavras-chave: Estimulação elétrica. Estimulação elétrica percutânea. Marcapasso diafragmático. Diafragma. Suíno.

ABSTRACT

Objectives: To develop a transthoracic implantation technique of ultrasound-guided electrodes for electrical stimulation of the diaphragm in pigs.

Materials and Methods: Five pigs were maintained under mechanical ventilation following a standardized anesthetic protocol. Ultrasound imaging of the thoracic base in each animal provided the visualization of the diaphragmatic zone which allowed the transthoracic implantation of the muscular electrodes. An electrical stimulation protocol of the diaphragm was performed through the implanted electrode. The amplitude of diaphragmatic excursion and the diaphragmatic thickness were recorded during inspiration and expiration. The diaphragm thickening fraction was calculated by ultrasound, evaluating the effect of the electrical stimulation compared to passive ventilation without neuromuscular blockade.

Results: No major complications were observed during the electrode implantation procedure. For both diaphragmatic dome, the median amplitude of diaphragmatic excursion was 1.025 cm (0.670 – 1.500 cm) during assisted ventilation and 1.330 cm (0.750 – 1.850 cm) during electrical stimulation, with no between-group difference, $P = 0,260$. The diaphragm thickening fraction ranged from 20.07% to 56.18% (median 31.87%) during passive ventilation and 23.81 to 105.01% (median 59.57%) during electrical stimulation, $P = 0,022$.

Conclusion: The electrical stimulation of the diaphragm with transthoracic implanted electrodes proved to be feasible and reproducible. The development of this technique can make diaphragmatic electrical stimulation a less invasive method and provide an effective alternative for the prevention of disuse atrophy in patients on mechanical ventilation.

Keywords: Electrical stimulation, percutaneous electrical stimulation, diaphragmatic pacemaker, diaphragm, pig

INTRODUÇÃO

O diafragma é um músculo esquelético que divide o tórax do abdome, é o principal músculo respiratório, contribuindo com cerca de 70% do volume corrente durante a inspiração em pessoas normais (1).

Como qualquer músculo esquelético, o diafragma é suscetível a perda de massa e atrofia causada pelo desuso que pode ocorrer em uma série de situações distintas (2). O tratamento ou treinamento da musculatura ventilatória, em especial o diafragma, é de difícil condução principalmente por sua localização e particularidades funcionais.

A eletroestimulação de nervos periféricos vem sendo utilizada clinicamente, é capaz de promover potenciais de ação, facilitando o movimento e fortalecendo a musculatura permitindo uma melhora nas atividades fisiológicas (1). O uso da eletricidade para evocar contrações musculares diafragmáticas também pode trazer benefícios clínicos como auxiliar ou mesmo manter ventilação artificial, além de permitir treinamento muscular e facilitar o desmame.

Aparelhos geradores de corrente elétrica foram produzidos para fins medicinais e hoje em dia estes dispositivos estão comercialmente disponíveis, conhecidos como o termo genérico de marcapasso diafragmático (MPD), termo que designa um dispositivo capaz de gerar impulsos elétricos no nervo frênico ou diretamente no músculo promovendo contrações diafragmáticas com o objetivo de restaurar uma respiração eficiente e permanente.

Atualmente, duas técnicas são utilizadas:

- marcapasso frênico intra-torácico (MPF-IT) que utiliza eletrodos posicionados em contato direto com o nervo frênico na região torácica, geralmente posicionados por videotoracoscopia. O procedimento é invasivo, requer manipulação e mobilização do nervo, o que pode resultar em lesão (3)(4).

- marcapasso diafragmático intraperitoneal (MPD-IP) que consiste na implantação do eletrodo por videolaparoscopia diretamente no hemidiafragma próximo aos ramos distais do nervo frênico (4).

As duas grandes indicações para estes procedimentos, apesar de ausência de estudos randomizados controlados, são: síndromes de

hipoventilação central e lesões medulares cervicais altas (acima de C3-C5) e ambos os procedimentos requerem procedimento cirúrgico invasivo (4).

O desenvolvimento de eletrodos diafragmáticos intramusculares com inserção transtorácica pode ser uma alternativa atrativa porque não permanecem em contato com o nervo frênico, evitam a necessidade de mobilizá-lo, com possibilidade de reduzir ou eliminar o risco de lesão neural.

O ultrassom diafragmático é um método simples e não invasivo para avaliação da contratilidade diafragmática, pode determinar a excursão diafragmática e permite também a visualização direta da espessura do diafragma na zona de aposição, observando-se durante a inspiração o encurtamento das fibras diafragmáticas e maior espessura muscular.

O procedimento de inserção transcutânea de eletrodo no diafragma guiado por ultrassonografia pode ser uma alternativa atraente para a estimulação diafragmática, pois permite a visualização do eletrodo no interior do ventre muscular na zona de aposição diafragmática, além disso, este procedimento poderia ser realizado a beira do leito, possibilitando a expansão das indicações deste dispositivo. Neste estudo, desenvolvemos um dispositivo para inserção de eletrodo transtorácico, o qual foi introduzido guiado por ultrassonografia, e analisamos a eficiência da estimulação diafragmática através deste método de imagem.

1.REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 ANATOMIA E FISIOLOGIA

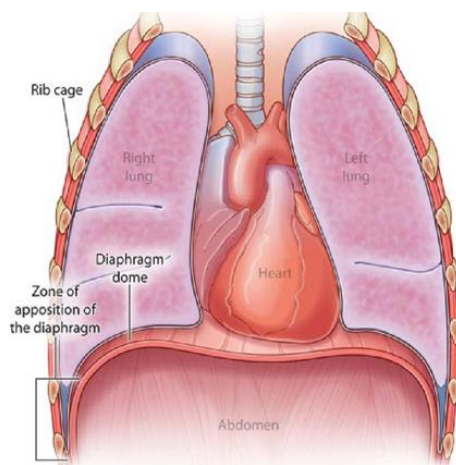
1.1.2 Anatomia

O diafragma é uma estrutura musculotendínea em formato de cúpula, com uma espessura de cerca de 2-4mm (5), apresenta uma porção aponeurótica central (centro tendíneo) e uma porção muscular periférica. É coberto por pleura no aspecto cefálico e por peritônio no aspecto caudal, exceto na área nua do fígado (1).

O diafragma separa a cavidade torácica do abdome, é muitas vezes considerado uma estrutura intratorácica porque sua maior função é alterar a pressão e volume intratorácico, contribuindo com aproximadamente 70% do volume corrente durante a inspiração em pessoas normais, sendo o principal músculo respiratório (1).

A presença de vísceras no tórax e abdome faz com que a parte do diafragma que as separa tenha uma orientação horizontal representada predominantemente pelo tendão central e a outra parte é chamada de zona de aposição, porque assume uma orientação vertical, constituída de fibras musculares. A zona de aposição está em contato com a caixa torácica e é de grande importância para a função diafragmática adequada (6). Uma visão esquemática da zona de aposição é demonstrada na Figura 1.

Figura 1 – Visão esquemática da zona de aposição (7) representando a relação entre a zona de aposição e a caixa torácica e pulmão.



Fonte: Sarwal A, Walker FO, Cartwright MS. Neuromuscular ultrasound for evaluation of the diaphragm. Muscle and Nerve. 2013, pg 322

Durante a inspiração as fibras diafragmáticas encurtam e todo diafragma move em direção caudal, reduz a pressão torácica e aumenta a pressão abdominal. A redução da pressão pleural produz o efeito de inflar o pulmão. Acompanhando o efeito de aumentar a pressão abdominal, isto faz com que ocorra expansão da caixa torácica (1).

O diafragma possui fixações (origens) distintas, a porção muscular é dividida em três partes (esternal, costal e lombar) de acordo com suas origens. A parte costal ou anterolateral é a principal responsável pelo movimento respiratório e se origina das faces internas das seis costelas inferiores e suas cartilagens costais de cada lado. As fibras verticais do diafragma se interdigitam com as fibras horizontais do músculo transverso abdominal (1)

A parte esternal ou anterior se origina do apêndice xifoide e pode estar ausente. A parte lombar ou pósterolateral se origina das vértebras lombares superiores e forma as cruras diafragmáticas direita e esquerda e ligamentos arqueados (1).

A porção muscular converge medialmente como aponeurose e forma o tendão central do diafragma que não apresenta inserção óssea, sendo fusionado no aspecto inferior do pericárdio fibroso (8).

Todo suprimento motor do diafragma é feito pelos nervos frênicos (C3-C5), que também enviam fibras sensitivas para a maior parte do diafragma (somente na periferia do diafragma as fibras sensitivas são provenientes dos seis ou sete nervos intercostais inferiores) (1).

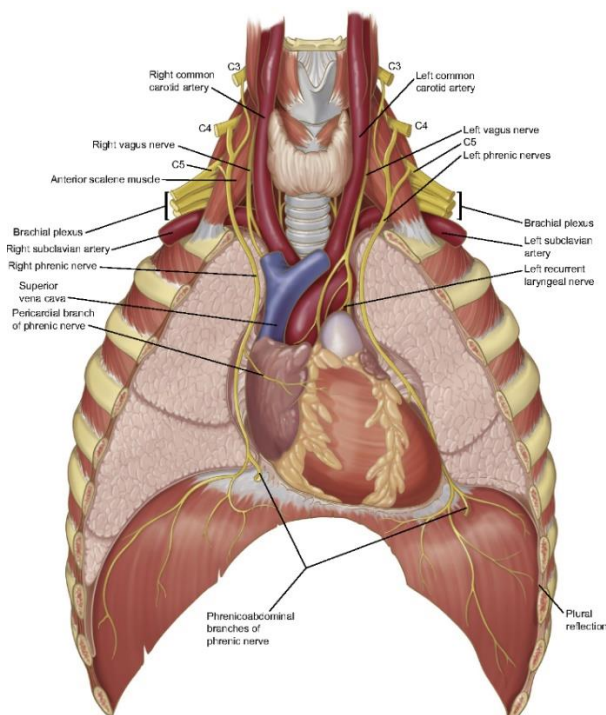
O nervo frênico se origina dos ramos ventrais das raízes nervosas de C3, C4 e C5, parte do plexo cervical. No pescoço o nervo frênico cursa na superfície anterior do músculo escaleno anterior, passando posteriormente a veia subclávia, então o curso difere em cada lado:

- direita - passa de anterior para lateral da artéria subclávia direita, entra no tórax via abertura torácica superior, descende anteriormente a raiz do pulmão direito, cursa ao longo do pericárdio do átrio direito, atravessa o diafragma através do hiato da veia cava inferior e inerva a superfície inferior do diafragma.

- esquerda - passa de anterior para medial da artéria subclávia esquerda, entra no tórax via abertura torácica superior, descende anteriormente a raiz do pulmão esquerdo, cruza o arco aórtico e cursa ao longo do pericárdio do ventrículo esquerdo, atravessa o domo do diafragma levemente mais anterior que o lado direito e inerva a superfície inferior do diafragma (1)(9)(10)(Figura 2).

No diafragma ambos dividem-se em três ramos – anterior, lateral e posterior (11) (Figura 2)

Figura 2 anatomia do nervo frênico no mediastino superior e médio e seus ramos diafragmáticos (12).



Smith, S. E., & Darling, G. E. (2011). Surface anatomy and surface landmarks for thoracic surgery: Part II. *Thoracic surgery clinics*, 21(2), 139-55.

O suprimento vascular diafragmático é especialmente através das artérias frênicas inferiores, usualmente originadas diretamente da aorta imediatamente acima do tronco celíaco e a drenagem venosa é um espelho do suprimento arterial (1).

Posteriormente o diafragma apresenta seus orifícios naturais: hiato aórtico, hiato esofágico e forame da veia cava inferior (1).

1.1.3 Fisiologia diafragmática

A principal função do diafragma é a ventilação, embora existam outras funções não ventilatórias (como auxílio na circulação sanguínea ao mudar a pressão torácica e abdominal, comportamentos expulsivos, expectoração, deglutição dentre outras) (13). Como anteriormente citado, o diafragma é uma estrutura em formato de domo constituída de uma aponeurose central, o tendão central, relativamente inelástico e o componente muscular periférico que apresenta elasticidade variável dependendo do grau de expansão da parede torácica. A região que está diretamente oposta à caixa torácica inferior constitui a chamada zona de aposição e se estende por 40% do total da superfície do caixa torácica e constitui 60% da área do músculo no final de expiração em repouso.

Quando as fibras musculares do diafragma estão ativadas o comprimento axial da zona de aposição diminui, e o domo, que é primariamente constituído pelo tendão central, descende. Esse descenso reduz a pressão intrapleural e aumenta a pressão abdominal, produz a expansão da cavidade pleural e o deslocamento das vísceras abdominais.

A configuração diafragmática é influenciada pelo conteúdo abdominal subdiafragmático e pelo intratorácico. O diafragma é mais alto em posição ortostática do que em posição supina (14).

O controle do diafragma ocorre através de duas vias descendentes principais, o trato corticoespinal do córtex aos neurônios motores respiratórios que são responsáveis pela respiração voluntária e o trato bulboespinal, que descende da medula através do quadrante ventrolateral da medula espinal para os neurônios motores respiratórios e controla a respiração espontânea (15).

Como todo músculo esquelético o diafragma é composto por unidades motoras, uma unidade motora é composta por um único neurônio motor alfa e todas as fibras que ele inerva, quando o neurônio motor é ativado o resultado é a ativação de todas as fibras da unidade motora (“tudo ou nada”). Todas as fibras da unidade motora são homogêneas no que se diz respeito às propriedades

bioquímicas, mecânica e fadiga. As propriedades da proteína contrátil expressada define o tipo de fibra muscular.

Unidades motoras e suas fibras musculares podem ser classificadas em 4 tipos baseado nas propriedades mecânicas e de fadiga (13).

- 1 – tipo S (slow)- lenta e resistente a fadiga
- 2 – tipo FR (fast, fatigue-resistant)- rápida e resistente a fadiga
- 3 – tipo FIInt (fast, fatigue-intermediate) – rápida e relativamente resistente a fadiga
- 4 – tipo FF (fast, fatigable) – rápida e fadigável

Em 1957, Henneman demonstrou que as unidades motoras recrutadas primeiro tem uma mais lenta velocidade de condução axonal, refletindo o menor tamanho e diâmetro axonal do neurônio (15). Neurônios motores menores têm um maior mudança de potencial da membrana comparado com os maiores para um dado nível de corrente sináptica. Esse princípio do tamanho prediz a ordem de recrutamento de unidades motoras.

As fibras tipo S e FR tem uma menor área seccional e geram menos força, mas tem uma alta densidade mitocondrial e capacidade oxidativa o que permite uma maior resistência a fadiga.

A força gerada no diafragma difere entre os diferentes comportamentos ventilatórios e expulsivos, as fibras S e FR são recrutadas inicialmente e predominam nos movimentos ventilatórios.

A pressão transdiafragmática gerada na eupneia é cerca de 8% da pressão inspiratória máxima (PI_{max}) em humanos. A hipóxia e a hipercapnia aumentam a força gerada no diafragma, e na oclusão mantida da via aérea (apneia do sono) a pressão gerada é 50-60% da máxima, mas não chega a usar a capacidade de reserva do diafragma, o que acontece em comportamentos expulsivos, onde o diafragma é capaz de recrutar fibras FIInt e FF podem ser usadas brevemente, não de forma sustentada (ex: tosse, espirro) (15).

1.2 DISFUNÇÃO DIAFRAGMÁTICA

A ventilação mecânica é uma terapia de suporte que salva vidas nos casos de falência respiratória, permite a troca gasosa e reverte a fadiga dos músculos respiratórios, apesar do benefício importante também é associada a complicações, como: infecção, barotrauma, injúria traqueal, etc. Em adição a estas complicações, evidências sugerem que a ventilação mecânica é uma importante causa de disfunção diafragmática, fenômeno referido como disfunção diafragmática induzida pelo ventilador (DDIV), definida como a perda da capacidade diafragmática de geração de força especificamente relacionada ao uso da ventilação mecânica (16).

A dificuldade em descontinuar o suporte ventilatório acontece em 20-25% dos pacientes em ventilação mecânica. Na prática clínica VIDD é um diagnóstico de exclusão baseado na história clínica apropriada e após a exclusão de outras possíveis causas de fraqueza diafragmática (choque, sepse, distúrbio eletrolítico, etc) (16).

As primeiras evidências que sugerem que a ventilação pode causar dano aos músculos respiratórios são provenientes de estudos em animais. Estudos em laboratório demonstraram que a combinação de inatividade diafragmática e ventilação mecânica por períodos prolongados (mais de 18 horas) é associada a atrofia de fibras musculares em ratos (17).

O processo é tempo dependente, com declínio precoce de força observado já no primeiro dia e piorando quando a ventilação é prolongada. Aspecto que também foi observado em estudo caso controle em humanos, onde foram comparadas as alterações diafragmáticas em biópsias transoperatórias em pacientes em ventilação mecânica prolongada 18-69h (doadores de órgão) e pacientes em transoperatório por doenças benignas e com ventilação limitada a 2-3h, demonstrando marcada atrofia de fibras, inferindo a possibilidade de alterações funcionais diafragmáticas precoces relacionadas ao desuso (2).

1.3 ELETROESTIMULAÇÃO

Baseado na capacidade para estimular nervos periféricos, a eletroestimulação neuromuscular vem sendo utilizada clinicamente e é capaz de promover potenciais de ação, facilitando o movimento e fortalecendo a musculatura, permitindo uma melhora nas atividades fisiológicas. O uso da eletricidade como recurso terapêutico em medicina é antigo. Os romanos usavam as descargas elétricas do peixe torpedo para o tratamento da gota e o alívio de dores de cabeça (18).

Com o passar do tempo, inúmeros aparelhos geradores de corrente elétrica foram produzidos para fins medicinais e a eletroestimulação diafragmática vem sendo objeto de pesquisa com o objetivo de manter ou melhorar a função respiratória.

Os primeiros relatos datam do século passado, com a observação que estímulos elétricos aplicados na superfície da base do pescoço produziam contrações diafragmáticas e foram utilizadas para ventilar uma mulher apneica vítima de asfixia tóxica de carvão (19).

Um parâmetro de protocolo de estimulação diafragmática elétrica transcutânea sugerindo em estudo anterior são os seguintes: 1) a corrente deveria ser modulável para ajustamento do tempo de subida de 1 segundo, tempo de sustentação de 1 segundo e tempo de relaxamento de 2 segundos; 2) a frequência seria em torno de 25 Hz a 30 Hz; 3) o pulso deveria estar entre 0,1ms e 10ms; 4) os eletrodos deveriam ser fixados em pontos paraxifoidianos ou intercostais; 5) a intensidade deveria ser a mínima para uma contração visível; 6) o tempo indicado seria de 20 minutos; 7) a eletroneuromiografia seria o método para avaliar, pois só seriam candidatos os pacientes com nervos frênicos íntegros (20).

Dos primeiros relatos até os dias de hoje observamos evoluções crescentes nas técnicas e resultados, sendo que o uso clínico de marcapasso diafragmático só ocorreu nas últimas décadas, a partir de estudos em pacientes com trauma raquimedular e síndrome de hipoventilação central congênita (21)(22).

O marcapasso frênico é indicado para pacientes dependentes de ventilação por paralisia respiratória central, mas com a função do nervo frênico e o diafragma mantidas. As duas principais indicações são: lesão alta da medula espinhal (nível de C3 ou acima) e hipoventilação alveolar central (congenita ou adquirida) (23). Comparado com a ventilação mecânica, o marcapasso diafragmático permite uma dinâmica respiratória mais natural, redução da ocorrência de infecção respiratória, melhora a qualidade de vida, além de reduzir custos com cuidados de saúde (24).

Existem dois tipos de dispositivos para a estimulação diafragmática, dependendo do local de implante: diretamente no nervo frênico ou diretamente no músculo diafragma. Os marcapassos conectados ao nervo frênico podem por sua vez serem implantados ao longo do nervo por via cervical ou torácica, pela mobilidade maior da região cervical e pelo maior índice de complicação, recomenda-se a implantação do dispositivo no segmento torácico. Os dispositivos intramusculares têm seus eletrodos implantados diretamente no músculo através de videolaparoscopia ou videotoracoscopia.

Atualmente as duas técnicas mais utilizadas são descritas abaixo:

- marcapasso frênico intra-torácico (MPD-IT) que utiliza eletrodos posicionados em contato direto com o nervo frênico na região torácica que são inseridos por videotoracoscopia. Além do implante do eletrodo ao redor do nervo frênico, é necessário posicionar uma extensão metálica do eletrodo na região cutânea (receptor). Um transmissor externo alimentado por bateria envia energia de radiofrequência ao receptor através de uma antena, o receptor converte essa energia em corrente elétrica que é direcionada para o nervo frênico, causando contração do diafragma. Os eletrodos geralmente utilizados são bi ou quadripolares (3)(4).

- marcapasso diafragmático intraperitoneal (MPD-IP) que consiste na implantação do eletrodo via videolaparoscopia diretamente no hemidiafragma próximo aos ramos distais do nervo frênico. O primeiro passo da técnica é mapear o ponto motor do nervo frênico, implantando o eletrodo diafragmático intramuscular. Cada eletrodo é diretamente conectado a um estimulador externo de quatro canais, através de cabos exteriorizados através da parede abdominal. O estimulador externo emite pulsos elétricos e fornece o tempo respiratório (4).

A corrente de estimulação normalmente varia de 5 – 20 mA para o MPD-IP e 0,5 – 2,2 mA para MPD-IT. A diferença é explicada pela posição do eletrodo em relação ao nervo frênico, que está em contato direto no MPD-IT necessitando de uma menor corrente para estimulação (4).

Não há estudos randomizados comparando as duas técnicas, mas ambas se executadas por grupos com experiência melhoram a qualidade de vida do paciente, trazem mais conforto com a respiração fisiológica, restauram o olfato e a comunicação verbal, e melhoram a mobilização do paciente. Em ambas é necessária a seleção rigorosa do paciente, com dois pontos importantes: devem apresentar interrupção definitiva da ventilação espontânea e permanecer com um nervo frênico normal conforme critérios eletrofisiológicos.

As complicações descritas são lesão irreversível do nervo frênico devido a manipulação necessária para implantação do MPD-IT, mal funcionamento do MPD-IP devido a hematoma diafragmático durante o procedimento e complicações decorrentes de infecção dentre outras.

Outra utilidade potencial da eletroestimulação diafragmática é o condicionamento muscular, o MPD-IP foi utilizado em pacientes com esclerose lateral amiotrófica (ELA) com condução do nervo frênico preservada, com o objetivo de reduzir o declínio da capacidade vital com sessões diárias de estimulação (3 a 5 sessões de 30 minutos) com intensidade de corrente de 13mA, sendo observado um aumento significativo da espessura diafragmática medida por ultrassom, com influência positiva na sobrevida e fisiologia diafragmática (25). Este mesmo resultado foi obtido em estudo de caso em que a eletroestimulação neuromuscular do diafragma foi aplicada em um paciente com lesão cervical alta que fazia uso de um marcapasso frênico, com remoção unilateral após infecção, por oito meses o paciente necessitou de ventilação mecânica e neste período foi aplicada a eletroestimulação em uma das hemicúpulas diafragmáticas por 30 minutos ao dia e avaliado através da mensuração do volume corrente e ultrassonografia, demonstrando que a espessura do diafragma que não teve estímulo após oito meses de ventilação mecânica se encontrava menor em relação ao que foi estimulado (0.18 versus 0.28 cm) e com uma diferença no volume corrente de 220 para 770ml (26).

Nosso grupo vem pesquisando novos modelos de estimulação elétrica do diafragma bem como novos eletrodos em estudos animais. O primeiro estudo foi desenvolvido em coelhos com implantação por laparotomia de eletrodos intramusculares diafragmáticos uni e bipolares e com diferentes intensidades de corrente aplicadas (20, 26 e 32mA) demonstrando um volume inspiratório maior que o linha de base utilizando tanto eletrodos uni como o bipolares (27) e o volume expiratório também mostrou uma relação proporcional com a intensidade de corrente (28). Posteriormente a técnica foi testada em suínos com eletrodos implantados por videolaparoscopia após exploração e identificação do ponto motor com bons resultados (29). Um novo protocolo de eletroventilação foi desenvolvido com corrente não polarizada com eletrodos monocanais que provou ser efetivo na estimulação simultânea de ambos os hemidiafragmas em suínos(30).

1.4 ULTRASSOM E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DIAFRAGMA EM HUMANOS

A mobilidade diafragmática pode ser estudada por fluoroscopia, entretanto, fluoroscopia não é portátil e utiliza radiação ionizante, limitando o seu uso. Ultrassonografia é uma alternativa que além de não apresentar estas desvantagens, fornece informações quantitativas e qualitativas (31).

O ultrassom diafragmático tem sido considerado um método simples e não invasivo para avaliação da contratilidade diafragmática, pode determinar a excursão diafragmática e permite também a visualização direta da espessura do diafragma na zona de aposição.

1.4.1 Avaliação da amplitude da movimentação diafragmática

A visualização direta da cúpula diafragmática pode ser obtida posicionando-se o transdutor na linha axilar média entre os espaços intercostais, porém nessa incidência a visualização do músculo torna-se difícil na inspiração profunda.

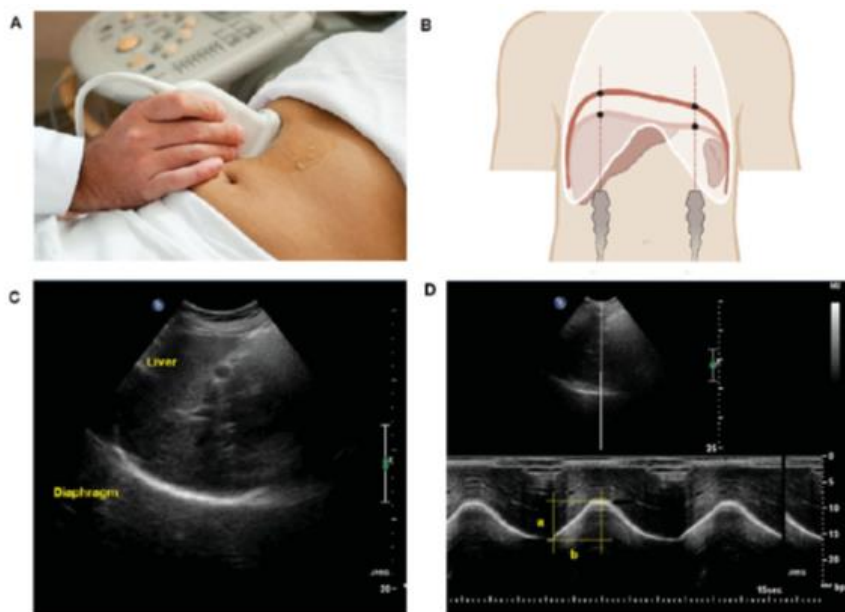
A maioria dos estudos utilizam a janela abdominal subcostal para a obtenção da imagem direta da cúpula diafragmática, o transdutor é posicionado entre a linha hemiclavicular e axilar anterior, deve ser inclinado cranial, medial e

dorsalmente para a visualização da porção posterior do diafragma (Figura 3). No modo B (Bidimensional) o diafragma é identificado como uma linha ecogênica entre a interface do fígado/baço e pulmão (32)(33). Então, o modo M (movimento) é utilizado para avaliação da excursão diafragmática.

Para isso é utilizado um transdutor de baixa frequência (2-6 MHz), idealmente curvilíneo, o diafragma direito é analisado através da janela hepática e o diafragma esquerdo através da janela esplênica. A avaliação do hemidiafragma esquerdo é mais limitada devido a interposição de gás no estômago e ângulo esplênico do cólon.

A medida da amplitude de excursão diafragmática durante o movimento respiratório é realizada na aquisição do modo M, com a linha M posicionada perpendicular à direção do movimento, mensurada através de uma linha vertical com um “caliper” posicionado no ponto mais baixo da curva correspondendo ao final da expiração normal e outro “caliper” posicionado no pico inspiratório (Figura 3).

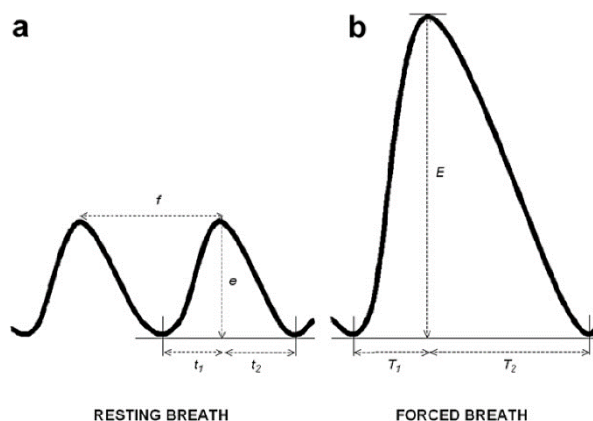
Figura 3. (A, B) transdutor curvilíneo posicionado em uma janela subcostal anterior. (C) visualização do diafragma no modo B. (D) avaliação da excursão diafragmática pelo modo M, “a” representa a amplitude da excursão durante um movimento respiratório e “b” representa o tempo para contração diafragmática, que pode ser usado para calcular a velocidade do movimento (31).



O valor normal da excursão diafragmática normal foi determinado e é maior em homens que em mulheres, portanto o gênero deve ser levado em consideração. O valor considerado o limite inferior da normalidade, foi de 0,9 cm para mulheres e de 1,0 cm para homens durante respiração superficial e 3,7 cm para mulheres e 4,7 cm para homens durante respiração profunda (32).

A onda obtida no modo M durante o movimento respiratório no repouso e durante respiração forçada apresentam um formato sinusoidal como demonstrado na Figura 4, a frequência respiratória corresponde a distância de dois picos da curva (f), a medida da excursão, como já descrito, corresponde a linha vertical entre o pico inspiratório e a base da curva (“e” e “E”), e o tempo inspiratório e expiratório também pode ser calculado (T_1 e T_2 , respectivamente) (34).

Figura 4 - Gráfico esquemático demonstrando a técnica de mensuração dos principais parâmetros ventilatórios e as curvas sinusoidais no modo M durante respiração no repouso (a) e forçada (b) (34).



Fonte: Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Gentiloni Silveri N. Ultrasound M-Mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol.* 2011, pg.47

Algumas vezes a acurácia da avaliação da excursão diafragmática por ultrassonografia é limitada parcialmente por dificuldades de obter um ângulo adequado de visualização do domo diafragmático pela interposição de gás, especialmente à esquerda. Alguns autores propõe a avaliação de outra estrutura

anatômica para reproduzir o movimento diafragmático, como o movimento do hilo ou o polo inferior do baço à esquerda e do ramo esquerdo da veia porta à direita. Esta abordagem indireta é realizada com transdutor posicionado no eixo craniocaudal e no modo B com a mensuração da mobilidade da estrutura anatômica durante o movimento respiratório (33)(35).

1.4.2 Avaliação da espessura diafragmática.

Uma abordagem intercostal é realizada e o diafragma é visualizado com um transdutor linear de alta frequência (7 -18 MHz) posicionado na zona de aposição, perpendicular a parede do tórax, geralmente no 8º -9º espaço intercostal entre a linha axilar anterior e axilar média (36).

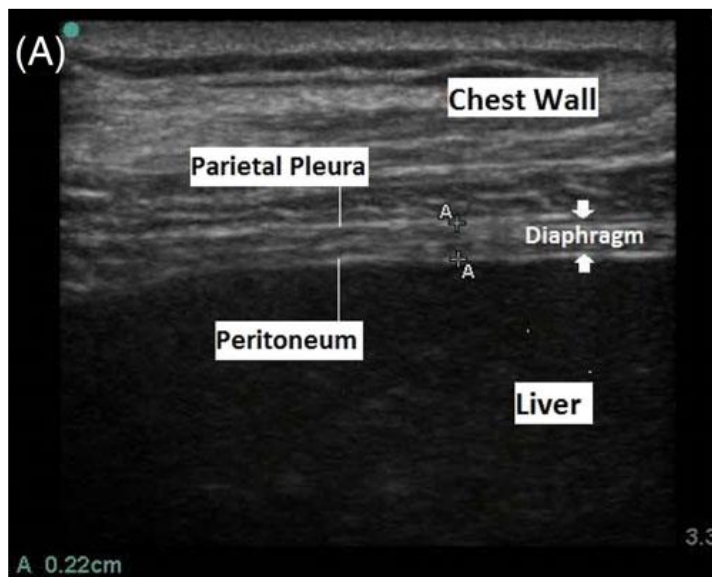
No modo B o diafragma é identificado em uma profundidade de 2 a 4 cm, como uma estrutura formada por duas linhas ecogênicas (a pleura parietal e a membrana peritoneal) e uma estrutura hipoecogênica entre as duas (correspondendo ao próprio músculo), a medida da espessura diafragmática deve ser realizada perpendicular a direção das fibras entre a pleura parietal e a membrana peritoneal (5) Figura 5.

Pode-se também utilizar a mudança de espessura do diafragma durante a ins/expiração, o aumento da espessura do diafragma na inspiração reflete a atividade contrátil do diafragma e a ausência de modificação da espessura durante inspiração sugere paralisia diafragmática (38).

A fração de espessamento diafragmático (FEdi) é calculado no modo B (Figura 6) ou no modo M (Figura 7) como uma percentagem de aumento da espessura do diafragma na inspiração em relação a espessura no final da expiração, seguindo a seguinte fórmula: $FEdi = (\text{espessura no final da inspiração} - \text{espessura no final da expiração}) / \text{espessura no final da expiração} \times 100\%$ (39).

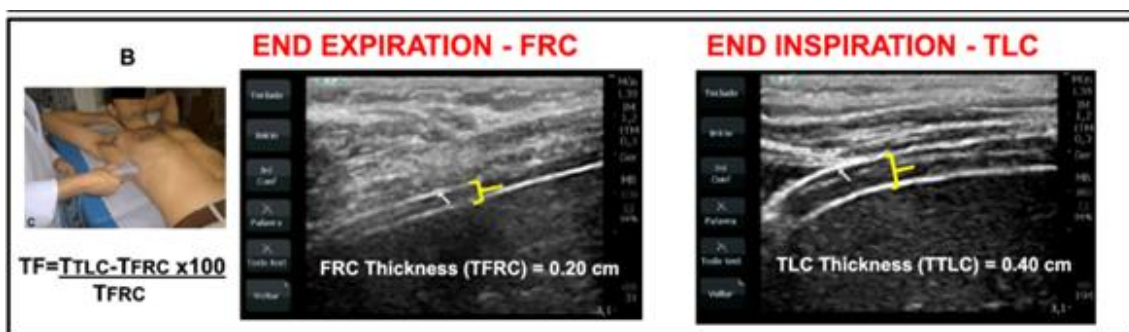
A relação entre a fração de espessamento diafragmático e o volume pulmonar tem sido relatado como linear (38)(41).

Figura 5 - Imagem ultrassonográfica do hemidiafragma direito obtida na zona de aposição. O diafragma pode ser identificado como uma estrutura superficial ao fígado, formada por duas linhas ecogênicas (a pleura parietal e a membrana peritoneal) e uma estrutura hipoecogênica entre as duas (correspondendo ao próprio músculo). A posição do “caliper” A-A indica a espessura do diafragma (37)



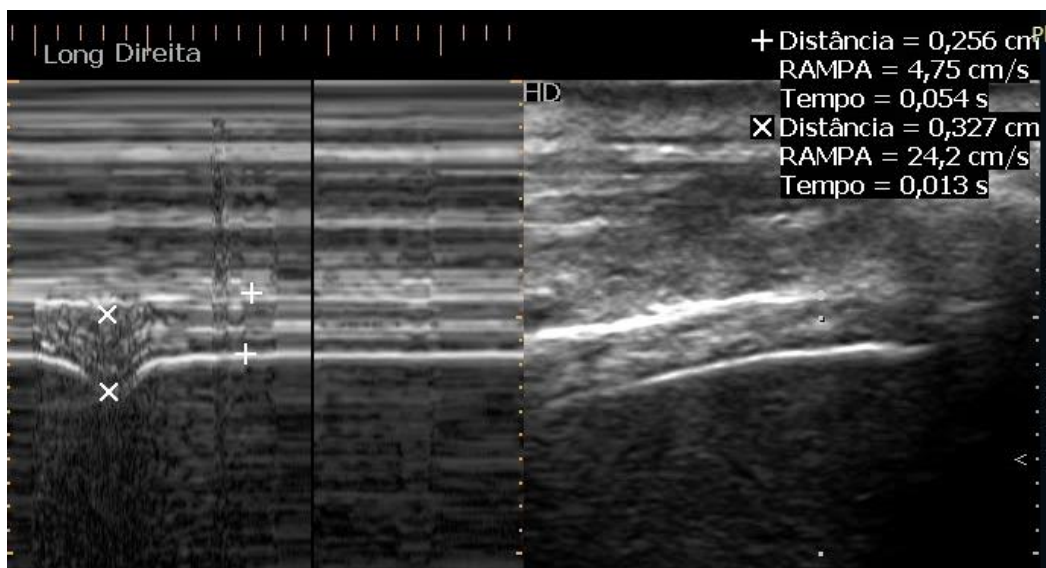
Fonte: Lu, Z., Ge, H., Xu, L., Guo, F., Zhang, G., & Wu, Y. (2019). Alterations in diaphragmatic function assessed by ultrasonography in mechanically ventilated patients with sepsis. *Journal of Clinical Ultrasound*, 47(4), 206-211.

Figura 6. Espessura do diafragma na zona de aposição no modo B, durante o movimento respiratório, no final da expiração e da inspiração para cálculo da fração de espessamento diafragmático. FRC = functional residual capacity (capacidade residual funcional) e TLC= total lung capacity (capacidade pulmonar total) (40).



Fonte: Diaphragmatic ultrasound, ventilatory strength and lung function • L. Z. Cardenas et al, pg.3

Figura 7 - Avaliação da espessura diafragmática no final da expiração (+ 0,256 cm) e da inspiração (x 0,327 cm) no modo M.



Fonte: própria

Em um estudo que avaliou 150 indivíduos normais foi demonstrado que o limite inferior da espessura diafragmática normal (no final da expiração ou capacidade residual funcional) é de 1,5mm com um aumento de no mínimo 20% da espessura do diafragma da capacidade residual funcional (CRF) até a capacidade pulmonar total (5). Neste mesmo estudo a média da espessura do diafragma direito na CRF foi de 3,3 +/- 1 mm e a média da espessura do diafragma esquerdo na CRF foi de 3,4 +/- 1,8 mm (5).

A mudança de espessura diafragmática de 38 a 96% foi relatada em indivíduos saudáveis e uma mudança de - 35 a 5% em pacientes com paralisia diafragmática. Espessamento diafragmático < 20% é proposto ser consistente com paralisia (42).

1.4.3 Aplicação clínica da ultrassonografia diafragmática

Há várias utilidades da ultrassonografia diafragmática como na identificação da paralisia diafragmática, avaliar prognóstico depois de paralisia diafragmática, entendimento da cinética da disfunção respiratória depois de acidente vascular isquêmico agudo, avaliação de falência no desmame da

ventilação mecânica, ajuste do marcapasso diafragmático, guia para eletroneuromiografia entre outros.

1.4.3.1 Ajuste do marcapasso diafragmático

Pacientes com paralisia podem se beneficiar de marcapasso diafragmático, que permite que o paciente se torne independente da ventilação mecânica. O ritmo do marcapasso necessita ser regulado dependendo da resposta diafragmática e necessidade fisiológica do paciente. A resposta ideal do diafragma varia conforme características do paciente, como idade e hábitos de vida. A Ultrassonografia é uma excelente ferramenta para avaliação quantitativa da excursão diafragmática enquanto o ritmo do marca-passo é ajustado em tempo real (43).

1.4.3.2 Avaliação da falência no desmame da ventilação

Como já descrito anteriormente a ventilação mecânica é associada com diminuição da força e alteração das propriedades contráteis do diafragma, levando a disfunção diafragmática em pacientes sem outra razão para suspeitar de patologia diafragmática ou do nervo frênico.

Uma combinação de excursão diafragmática $\geq 10,5$ mm e TDI ≥ 21 mm tem uma sensibilidade baixa, de 64,9%, mas uma especificidade próxima de 100% para predizer sucesso da extubação (39).

1.4.3.3 Guia para eletroneuromiografia diafragmática

A avaliação diafragmática por eletroneuromiografia pode ser um desafio devido ao risco de lesão ao pulmão, fígado e baço durante o procedimento. O ultrassom permite uma visualização direta e em tempo real dos tecidos moles e limites anatômicos, permitindo realização do procedimento com maior segurança. Dois métodos têm sido usados, no primeiro o exame ultrassonográfico pode ser usado para medir a profundidade do diafragma e avaliar anomalias, o transdutor é então removido e a agulha é inserida. A segunda técnica faz uso do ultrassom para guiar diretamente a colocação da agulha (44).

3- JUSTIFICATIVA

Como qualquer músculo esquelético, o diafragma é suscetível à perda de massa e atrofia causada pelo desuso que pode ocorrer em uma série de situações distintas. O tratamento ou treinamento da musculatura ventilatória, em especial o diafragma, é de difícil condução principalmente por sua localização e particularidades funcionais.

O uso da eletricidade para evocar contrações musculares é uma técnica bem descrita na literatura e com aplicações variáveis. Este estudo propõe a utilização da estimulação elétrica do músculo diafragma através da inserção transtorácica de eletrodo para produzir contração do músculo e induzir ventilação em animais anestesiados com o objetivo de verificar a eficácia desta técnica como opção para a ventilação artificial, treinamento da muscular ou facilitar o desmame.

OBJETIVOS

Objetivo Primário

- Desenvolver um modelo de implantação transtorácica de eletrodo guiado por ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma em suínos.

Objetivos Secundários

- Padronizar a técnica de inserção de eletrodo no diafragma
- Identificar e descrever as delimitações anatômicas para a punção diafragmática em suínos
- Avaliar a eficácia do eletrodo para estimulação diafragmática
- Avaliar a espessura do músculo durante a ventilação mecânica e a estimulação elétrica.
- Avaliar a incidência de complicações do procedimento.

REFERÊNCIAS

1. Moore KL, Dalley AF, Agur AMR. Moore Clinically Oriented Anatomy. Journal of Chemical Information and Modeling. 2014.
2. Levine S, Nguyen T, Taylor N, Friscia ME, Budak MT, Rothenberg P, et al. Rapid Disuse Atrophy of Diaphragm Fibers in Mechanically Ventilated Humans. N Engl J Med. 2008;
3. Khong P, Lazzaro A, Mobbs R. Phrenic nerve stimulation: The Australian experience. J Clin Neurosci. 2010;
4. Le Pimpec-Barthes F, Legras A, Arame A, Pricopi C, Boucherie JC, Badia A, et al. Diaphragm pacing: The state of the art. Journal of Thoracic Disease. 2016.
5. Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, Strommen JA, Watson JC, Sorenson EJ. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: Quantitative values in normal subjects. Muscle and Nerve. 2013;
6. Umbrello M, Formenti P. Ultrasonographic Assessment of Diaphragm Function in Critically Ill Subjects. Respir Care. 2016;
7. Sarwal A, Walker FO, Cartwright MS. Neuromuscular ultrasound for evaluation of the diaphragm. Muscle and Nerve. 2013.
8. Federle M et al. Imaging Anatomy: Chest, Abdomen, Pelvis. 2nd ed. Elsevier; 2017. 1192 p.
9. Nason LK, Walker CM, Mcneeley MF, Burivong W, Fligner CL, David Godwin J. Imaging of the diaphragm: Anatomy and function. Radiographics. 2012;
10. Frank H. Netter M. Netter - Atlas de Anatomía Humana. Masson. 2015.
11. Verlag JFL, Schwarzenberg, Urban. Sobotta Atlas of Human Anatomy, Volume 2: Trunk, Viscera, Lower Limb. In: Sobotta : Atlas of Human Anatomy Volume 2. 2006.
12. Smith, S. E., & Darling GE. Surface anatomy and surface landmarks for thoracic surgery: Part II. Thorac Surg Clin. 2011;21:139–55.
13. Fogarty MJ, Mantilla CB, Sieck GC. Breathing: Motor control of diaphragm muscle. Physiology. 2018.
14. De Troyer A, Wilson TA. Action of the diaphragm on the rib cage.

- Journal of Applied Physiology. 2016.
15. Henneman, E.; Somjen GCDO. Functional Significance of Cell Size in Spinal Motoneurons. *J Neurophysiol.* 1965;28:560–80.
 16. Jubran A. Critical illness and mechanical ventilation: effects on the diaphragm. *Respir Care.* 2006;
 17. Gayan-Ramirez G, Testelmans D, Maes K, Rácz GZ, Cadot P, Zádor E, et al. Intermittent spontaneous breathing protects the rat diaphragm from mechanical ventilation effects. *Crit Care Med.* 2005;
 18. Robinson, Andrew J. Snyder-Mackler L. *Eletrofisiologia clínica: eletroterapia e teste eletrofisiológico.* 2nd ed. Artmed, editor. Porto Alegre; 2001.
 19. Sarnoff, S.J.; Hardenbergh, E.; Whitternberg JL. Electrophrenic respiration. *Am J Physiol Content.* 1948;155(1):1–9.
 20. Geddes LA. Electrical ventilation: a missed opportunity. *Biomed Instrum Technol.* 1998;32:401–14.
 21. Glenn WW, Holcomb WG, Gee JB, Rath R. Central hypoventilation; long-term ventilatory assistance by radiofrequency electrophrenic respiration. *Ann Surg.* 1970;
 22. Glenn WW, Holcomb WG, McLaughlin AJ, O'Hare JM, Hogan JF, Yasuda R. Total ventilatory support in a quadriplegic patient with radiofrequency electrophrenic respiration. *Proc Veterans Adm Spinal Cord Inj Conf.* 1971;
 23. DiMarco AF. Phrenic nerve stimulation in patients with spinal cord injury. *Respiratory Physiology and Neurobiology.* 2009.
 24. Weese-Mayer DE, Berry-Kravis EM, Ceccherini I, Keens TG, Loghmanee DA, Trang H. An official ATS clinical policy statement: Congenital central hypoventilation syndrome - Genetic basis, diagnosis, and management. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine.* 2010.
 25. Onders RP, Elmo M, Kaplan C, Katirji B, Schilz R. Final analysis of the pilot trial of diaphragm pacing in amyotrophic lateral sclerosis with long-term follow-up: Diaphragm pacing positively affects diaphragm respiration. *Am J Surg.* 2014;
 26. Ayas NT, McCool FD, Gore R, Lieberman SL, Brown R. Prevention of human diaphragm atrophy with short periods of

- electrical stimulation. *Am J Respir Crit Care Med.* 1999;
27. Ghedini RG, Margarites A, Felix EA, Xavier RG, Andrade CF. Development of a new experimental model of intramuscular electrical stimulation of the diaphragm in rabbits. *Acta Cir Bras.* 2010;
 28. Ghedini RG, Espinel J de O, Felix EA, Paludo A de O, Mariano R, Holand ARR, et al. Effectiveness of diaphragmatic stimulation with single-channel electrodes in rabbits. *J Bras Pneumol.* 2013;
 29. Ghedini RG, Paludo A de O, Mariano R, Silva ÉF, Thomaz LDGR, Diehl G, et al. Technique for implanting intramuscular electrodes in the diaphragm by videolaparoscopy in pigs. *Acta Cir Bras.* 2016;
 30. Guellner Ghedini R, de Oliveira Paludo A, Mariano R, Franco Silva É, Lise Simoneti LE, Dalla Giacomassa Rocha Thomaz L, et al. Proposal of a New Electrode and Modality of Electrical Stimulation for Diaphragmatic Pacemakers. *Ann Thorac Surg.* 2018;
 31. Sarwal A, Walker FO, Cartwright MS. Neuromuscular ultrasound for evaluation of the diaphragm. *Muscle and Nerve.* 2013.
 32. Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by M-mode ultrasonography. *Chest.* 2009;
 33. Toledo NSG, Kodaira SK, Massarollo PCB, Pereira OI, Dalmas JC, Cerri GG, et al. Left Hemidiaphragmatic Mobility. *J Ultrasound Med.* 2006;
 34. Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Gentiloni Silveri N. Ultrasound M-Mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol.* 2011;
 35. Toledo NSG, Kodaira SK, Massarollo PCB, Pereira OI, Mies S. Right Hemidiaphragmatic Mobility: Assessment with US Measurement of Craniocaudal Displacement of Left Branches of Portal Vein. *Radiology.* 2003;
 36. Matamis D, Soilemezi E, Tsagourias M, Akoumianaki E, Dimassi S, Boroli F, et al. Sonographic evaluation of the diaphragm in critically ill patients. Technique and clinical

- applications. *Intensive Care Medicine*. 2013.
37. Lu, Z., Ge, H., Xu, L., Guo, F., Zhang, G., & Wu Y. Alterations in diaphragmatic function assessed by ultrasonography in mechanically ventilated patients with sepsis. *J Clin Ultrasound*. 2019;47(4):206–11.
 38. Mccool FD, Tzelepis GE, Concepts C, Mccool FD, Tzelepis GE. Dysfunction of the Diaphragm. *N Engl J Med*. 2012;
 39. Farghaly S, Hasan AA. Diaphragm ultrasound as a new method to predict extubation outcome in mechanically ventilated patients. *Aust Crit Care*. 2017;
 40. Cardenas LZ, Santana PV, Caruso P, Ribeiro de Carvalho CR, Pereira de Albuquerque AL. Diaphragmatic Ultrasound Correlates with Inspiratory Muscle Strength and Pulmonary Function in Healthy Subjects. *Ultrasound Med Biol*. 2018;
 41. Wait JL, Nahormek PA, Yost WT, Rochester DP. Diaphragmatic thickness-lung volume relationship in vivo. *J Appl Physiol*. 1989;
 42. Gottesman E, McCool FD. Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;
 43. Ayoub J, Cohendy R, Dautzat M, Targhetta R, De La Coussaye JE, Bourgeois JM, et al. Non-invasive quantification of diaphragm kinetics using m-mode sonography. *Can J Anaesth*. 1997;
 44. Harper CJ, Shahgholi L, Cieslak K, Hellyer NJ, Strommen JA, Boon AJ. Variability in diaphragm motion during normal breathing, assessed with b-mode ultrasound. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2013;

ARTIGO CIENTÍFICO

Modelo de implantação transtorácica de eletrodo guiado por ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma de suínos

Aline Spader Casagrande¹, Rodrigo Guellner Ghedini^{2,3,4}, Cristiano Feijó Andrade^{2,4}.

1. Serviço de Radiologia, Hospital de Clínicas de Porto Alegre, RS, Brasil
2. Serviço de Cirurgia Torácica, Hospital de Clínicas de Porto Alegre, RS, Brasil
3. Serviço de Fisioterapia, Hospital de Clínicas de Porto Alegre, RS, Brasil
4. Laboratório de Vias Aéreas e Pulmão – HCPA – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Autor para correspondência: Cristiano Feijó Andrade, e-mail: cristianofa@gmail.com

INTRODUÇÃO

O diafragma é um músculo esquelético que divide o tórax do abdome, é o principal músculo respiratório, contribuindo com cerca de 70% do volume corrente durante a inspiração em pessoas normais (1).

Como qualquer músculo esquelético, o diafragma é suscetível à perda de massa e atrofia causada pelo desuso que pode ocorrer em uma série de situações distintas (2)(3). O tratamento ou treinamento da musculatura ventilatória, em especial do diafragma, é de difícil realização, principalmente por sua localização e particularidades funcionais.

A eletroestimulação de nervos periféricos vem sendo utilizada clinicamente, é capaz de promover potenciais de ação, facilitando o movimento e fortalecendo a musculatura permitindo uma melhora nas atividades fisiológicas. O uso da eletricidade para evocar contrações musculares diafragmáticas também pode trazer benefícios clínicos como auxiliar ou mesmo manter ventilação artificial, além de permitir treinamento muscular e facilitar o desmame (4).

Atualmente, os dispositivos comercialmente disponíveis conhecidos como marcapassos diafragmáticos (MPD) tem o objetivo de restaurar uma respiração eficiente e permanente. Existem dois métodos de estimulação elétrica do diafragma: o marcapasso frênico (MPF) que utiliza eletrodos posicionados em contato direto com o nervo frênico na região cervical ou torácica (5)(4), e o marcapasso diafragmático intraperitoneal (MPD-IP) que consiste na implantação do eletrodo através de

videolaparoscopia diretamente nos pontos motores de ambas as cúpulas diafragmáticas(4).

As duas grandes indicações para eletroventilação, apesar de ausência de estudos randomizados controlados, são: síndromes de hipoventilação central e lesões medulares cervicais altas (acima de C3-C5) sendo que ambos necessitam de procedimentos cirúrgicos invasivos sob anestesia geral para posicionamento dos eletrodos (4).

O desenvolvimento de eletrodos diafragmáticos intramusculares com inserção transtorácica pode ser uma alternativa atrativa aos métodos mais invasivos de eletroventilação, uma vez que os eletrodos não permanecem em contato direto com o nervo frênico, evitando assim a necessidade de mobilizá-lo resultando em menor risco de lesão neural. Além disso, a utilização de métodos de imagem, como a ultrassonografia torácica, que auxiliam na inserção dos eletrodos, tornam o procedimento mais seguro e reprodutível, podendo este ser realizado a beira leito.

O ultrassom diafragmático também é um método simples e não invasivo para avaliação da contratilidade diafragmática, pode determinar a excursão diafragmática e permite também a visualização direta da espessura do diafragma na zona de aposição, observando-se durante a inspiração o encurtamento das fibras diafragmáticas e maior espessura muscular (6).

Baseados em estudos prévios de nosso grupo abordando eletro estimulação diafragmática(7) (8) (9) (10), desenvolvemos um eletrodo intramuscular para inserção transcutânea para ser inserido guiado por ultrassonografia. Avaliamos a eficácia e reprodutibilidade do método, bem como espessamento diafragmático e amplitude da contração diafragmática em modelo experimental suíno.

CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que foi possível desenvolver um modelo de implantação transtorácica de eletrodo guiado por ultrassonografia para estimulação elétrica do diafragma em suínos. Na nossa experiência a abordagem transcutânea de implantação de eletrodo diafragmático guiado por ultrassom foi segura, sem complicações graves, e minimamente traumática. Através da padronização da técnica de implantação, eletrodo foi posicionado na zona de aposição e o estímulo elétrico foi capaz de gerar movimentação diafragmática.

A contração diafragmática foi avaliada por ultrassom, através da medida da amplitude de movimentação do diafragma e indiretamente pela variação da espessura do músculo na zona de aposição durante a inspiração e expiração, refletindo contração muscular.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento realizado é simples e sem complicações graves. Muito provavelmente possa ser realizado em humanos à beira do leito, como modalidade de condicionamento da musculatura diafragmática, beneficiando pacientes em unidades de terapia intensiva. Estudos adicionais são necessários para verificar se estímulos repetidos são capazes de manter o trofismo muscular, além de testar diferentes protocolos com frequência de pulso e intensidade da corrente adequadas para manter o tônus diafragmático.

GRUPO DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

Certificamos que o projeto abaixo, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica, encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovada pela COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA) e pelas áreas de apoio indicadas pelo pesquisador.

Projeto: 170474

Data de Aprovação do Projeto: 05/12/2017

Título: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA TRANSCUTÂNEA DO DIAFRAGMA EM SUÍNOS Data de Término: 30/11/2018

Pesquisador Responsável: CRISTIANO FELDO ANDRADE

Equipe de pesquisa:

DIOGO MACHADO KAMINSKI

Submissão	Documento	Especie/Linhagem	Sexo/Idade	Qtd.	Data Reunião	Situação
05/12/2017	APROVAÇÃO	SUÍNO - LARGE WHITE	F/65dias	6	05/12/2017	APROVADO

Total de Animais: 6

Coordenador

Comissão de Ética no Uso de Animais

- Os membros da CEUA/HCPA não participaram do processo de avaliação onde constam como pesquisadores.
- Toda e qualquer alteração do Projeto deverá ser comunicada à CEUA/HCPA.
- O pesquisador deverá apresentar relatórios semestrais de acompanhamento e relatório final ao CEUA/HCPA.

ANEXOS E APÊNDICES