

CURSO DE VMNI

NIPPON 2026



Fisiologia da Ventilação Mecânica Não-invasiva



Miguel Guia

*Coordenador Unidade de Ventilação Não Invasiva, Serviço de
Pneumologia, ULS Santa Maria*

*Cocoordenador Unidade de Internamento Enfermaria, Serviço
de Pneumologia, ULS Santa Maria*

Faculdade de Medicina Universidade de Lisboa

Serviço de Pneumologia Hospital da Luz - Clínica da Amadora



INTRODUÇÃO

Insuficiência Respiratória

Insuficiência Respiratória: incapacidade do sistema respiratório em manter trocas gasosas adequadas

Insuficiência Respiratória Hipoxêmica (Parcial, Tipo 1): $\text{PaO}_2 < 70 \text{ mmHg}$ e $\text{PaCO}_2 < 45 \text{ mmHg}$

Insuficiência Respiratória Hipercápnica (Global, Tipo 2): $\text{PaCO}_2 > 45 \text{ mmHg}$

Insuficiência respiratória não é uma doença, mas sim uma possível consequência de várias doenças

INTRODUÇÃO

Insuficiência Respiratória

IRA Hipoxêmica	IRA Hipercápnica
<i>"Lung failure"</i>	<i>"Pump failure"</i>
Pneumonia EAP cardiogénico Traumatismo torácico	DPOC Doenças neuro-musculares Deformidades caixa torácica Obesidade

INTRODUÇÃO

Insuficiência Respiratória - Hipoxemia

Hipoxemia

Alterações V/Q

- Alteração da ventilação por obstrução pequenas vias aéreas (DPOC,...)
- Alteração vias aéreas por infiltrado alveolar (infeccioso, cardiogénico,...)
- Alterações nos vasos (tromboembolismo pulmonar, hipertensão pulmonar)
- Shunt intrapulmonar por ausência de ventilação (pneumonia, atelectasia)
- Shunt anatómico (malformação arterio-venosa intrapulmonar, cardiopatias congénitas)

Diminuição da difusão

- Patologias do interstício pulmonar

Rarefação de oxigénio na atmosfera (hipoxemia da altitude)

- FiO_2 21%, mas diminuição da pressão atmosférica, logo diminuição da pressão parcial de O_2

Contaminação do ar (diminuição FiO_2)

INTRODUÇÃO

Insuficiência Respiratória - Hipercapnia

Falência da bomba ventilatória

- ✓ SNC
- ✓ Nervos espinhais e periféricos
- ✓ Junção neuromuscular
- ✓ Músculos respiratórios
- ✓ Caixa torácica

HIPOVENTILAÇÃO

Início no sono

Alterações Fisiológicas na Ventilação durante o Sono (em saudáveis):

- Aumento atividade neurónios secretores ácido gama-aminobutírico
- Ação depressora sobre o centro respiratório

- ❖ REM: perda da atividade muscular intercostal
- ❖ Maior dependência do diafragma

HIPOVENTILAÇÃO

Início no sono

Alterações Fisiológicas na Ventilação durante o Sono (em saudáveis):

- Resposta ventilatória à hipoxia e hipercapnia está atenuada
(alteração da quimiossensibilidade)
- Aumento da resistência da VAS (perda de tônus muscular naso-faríngeo)
- Aumento da carga sobre o sistema respiratório
- Ligeiro grau de broncoconstrição
- Aumento ligeiro da resistência das VAI

HIPOVENTILAÇÃO

Caraterização

Hipoventilação: $\text{PaCO}_2 > 45 \text{ mmHg}$

Hipoventilação noturna - AASM Task Force 2012 (AASM 2023):

- 1) arterial carbon dioxide (or a surrogate such as transcutaneous or P_{ETCO_2}) $>55 \text{ mmHg}$ for $\geq 10 \text{ min}$; or
- 2) an increase in carbon dioxide tension $>10 \text{ mmHg}$ from awake supine value to a value $>50 \text{ mmHg}$ for $\geq 10 \text{ min}$.

HIPOVENTILAÇÃO

Avaliação - Oximetria Noturna

Dessaturação significativa ???

CT90 > 30% DPOC

CT90 > 10% Patologia pulmonar difusa

CT90 > 5% ELA

SpO₂ média < 90% DPOC

SpO₂ média ≤ 88% SOH (Pickwick)

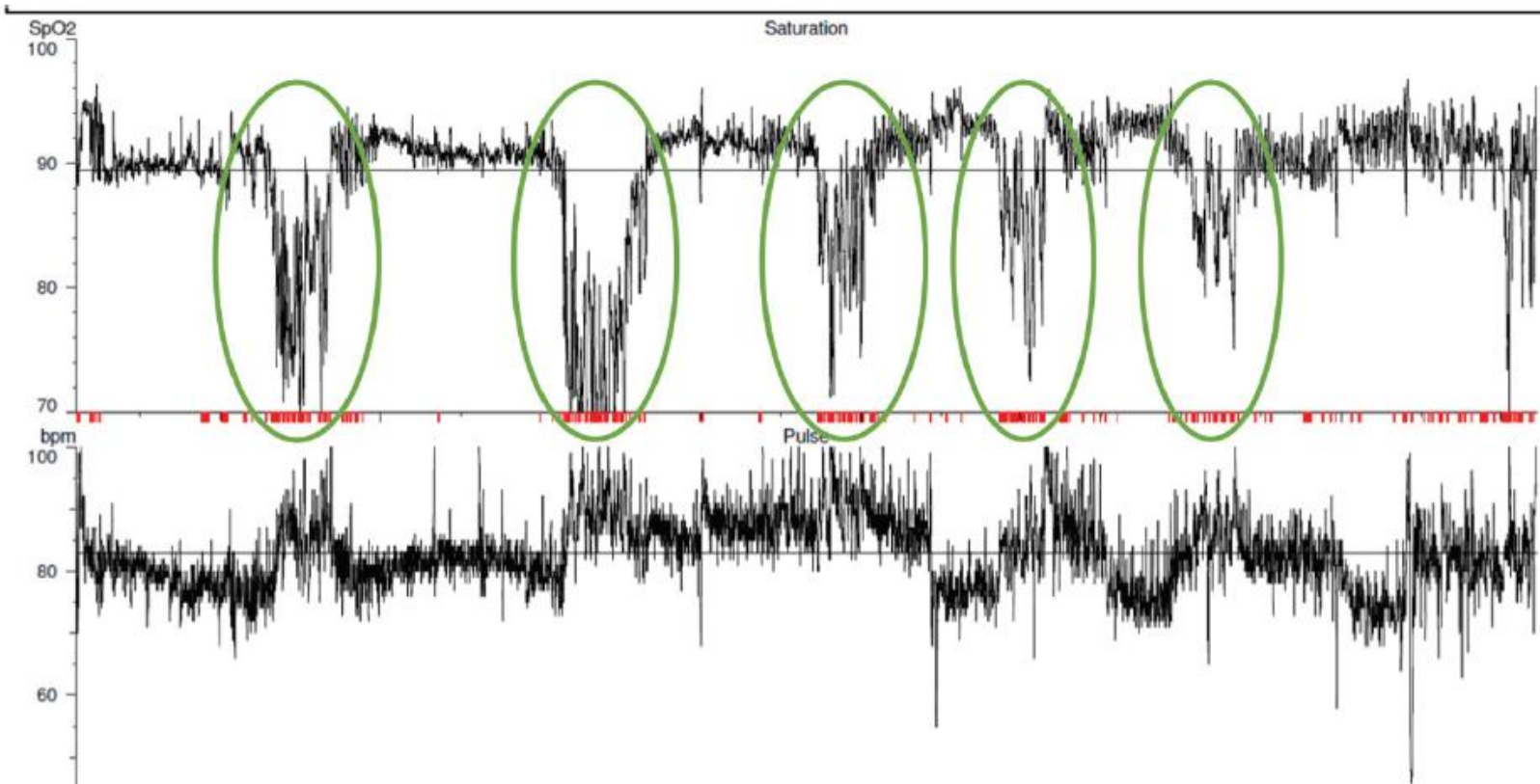
Mas influenciada por alterações V/Q

Afetada por oxigenoterapia suplementar

Padrão de dessaturação

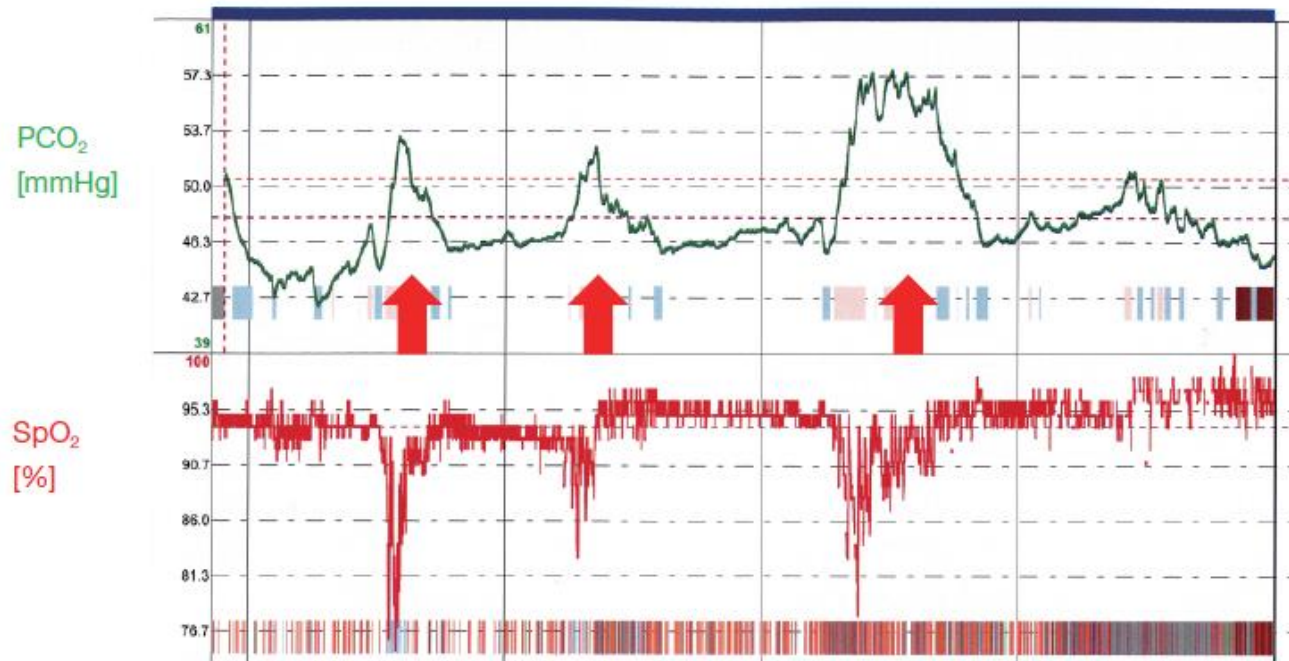
HIPOVENTILAÇÃO

Avaliação - Oximetria Noturna



HIPOVENTILAÇÃO

Avaliação - Capnografia Transcutânea Noturna



FISIOPATOLOGIA SUMÁRIA

Principais patologias que beneficiam de VNI

Síndrome Obesida-Hipoventilação

Alterações na mecânica ventilatória pela obesidade

Excesso de tecido adiposo no abdómen e à volta da parede torácica	Aumento da resistência das vias aéreas inferiores	Atelectasias (LI)
Redução da excursão diafragmática Redução dos volumes pulmonares (CRF, VRE) Redução da complacência pulmonar	<i>Air trapping</i> por encerramento prematuro das VA <i>Auto-PEEP</i>	Desequilíbrios V/Q

Síndrome Obesida-Hipoventilação

Alterações no drive respiratório

Aumento do trabalho respiratório

Aumento do drive respiratório para manter eucapnia

SRH inicia-se em REM (alterações mecânicas e diminuição do drive)

SRH em REM repetitiva » depressão secundária dos centros respiratórios

Hipercapnia diurna

Diminuição do drive por resistência central à ação da leptina

**SRH: sleep related hypoventilation*

Síndrome Obesida-Hipoventilação

Alterações respiratórias durante o sono

- Deposição de gordura à volta VAS
- Diminuição volumes pulmonares
- Acumulação fluidos (deslocamento rostral)

Apneias e hipopneias longas (SOH)

Ventilação compensatória pós-evento insuficiente (redução atividade do centro respiratório)

❖ "Overload" de CO₂ durante a noite » hipercapnia diurna

DPOC

Fisiopatologia

Obstrução irreversível do fluxo expiratório:

- aumento da resistência das VA pequeno calibre
- colapso VA
- perda de *elastic recoil*
- aumento da constante de tempo



Mismatch V/Q:

- colapso precoce das pequenas vias aéreas: com alteração da ventilação alveolar
- destruição dos capilares pulmonares (cria espaço morto fisiológico)



Hiperinsuflação:

- aplanamento do diafragma, relação comprimento-tensão desfavorável para gerar força
- auto-PEEP: com aumento da força que é necessário gerar para iniciar inspiração



DNM Lentamente Progressivas

Fisiopatologia

Hipoventilação

Diminuição atividade diafragma

Diminuição tónus VAS

Diminuição do drive respiratório central

DNM Lentamente Progressivas

Fisiopatologia

» Fraqueza muscular

...fraqueza muscular



Desenvolvem:

- ✓ alterações fibróticas da caixa torácica
- ✓ deformidades coluna

- » aumento *elastic recoil*
- » limitação capacidade inspiratória
- » padrão restritivo
- » padrão de taquipneia
- » aumento da ventilação de espaço morto

Esclerose Lateral Amiotrófica

Fisiopatologia

- » Fraqueza muscular
- » Alterações na mecânica ventilatória
- » Alterações no controlo central da respiração

» Disfunção glote

Pneumonia/IRAH

Patient Self-Inflicted Lung Injury (P-SILI)

P-SILI é gerada por esforço inspiratório intenso; deve-se a:

- swings na pressão transpulmonar (stress pulmonar) » insuflação de grandes volumes num compartimento areado reduzido
- aumento pressão transvascular » edema pulmonar de pressão negativa
- deslocação intra-tidal de ar entre diferentes zonas pulmonares (das zonas não-dependentes para as regiões dependentes), gerada pela transmissão diferente de força muscular (pêndulo)
- lesão diafragmática (devido ao desenvolvimento de elevadas forças mecânicas no músculo)

Pneumonia/IRAH

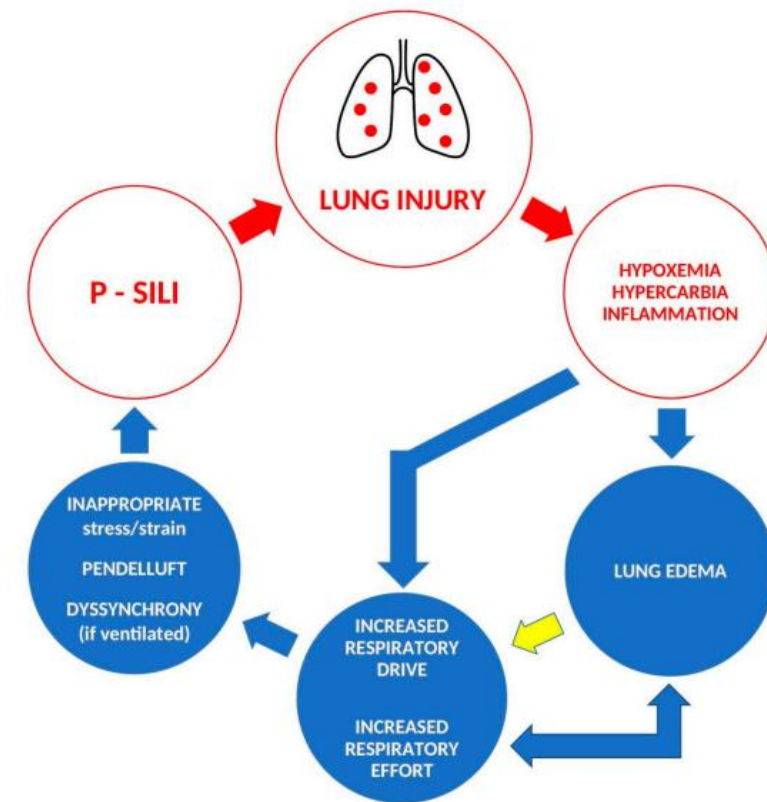
Patient Self-Inflicted Lung Injury (P-SILI)

Manutenção de respiração espontânea em doentes com pulmões danificados e elevado drive respiratório:

- alterações de pressão/volume globais/regionais



- agravam a lesão pulmonar inicial



EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI aumenta ventilação/minuto

- VT pode ser criado (ciclo controlado) ou aumentado (ciclo assistido)
- a menos que haja aumento marcado do espaço morto (VD), o aumento da Vent/min (VE) traduz-se por aumento da ventilação alveolar (V_A); $V_A = V_E - VD$

$$PaO_2 = PIO_2 - (VO_2/V_A) \times k$$

$$PaCO_2 = (VCO_2/V_A) \times k$$

PIO_2 : O_2 inspirado

VO_2 : consumo total de O_2 pelo copo

VCO_2 : produção total de CO_2 pelo corpo

k: constante

À medida que a V_A aumenta a PO_2 aproxima-se da PIO_2 e a PCO_2 aproxima-se de 0

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI aumenta ventilação/minuto

As PO_2 e PCO_2 finais no sangue venoso pulmonar dependem de:

- V_A
- transporte alvéolo-capilar de gás
- relação V/Q

Fatores que afetam V/Q:

- resistências regionais
- complacências regionais
- capacidades residuais funcionais regionais
- padrão de entrega de pressão/fluxo do ventilador

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI aumenta ventilação/minuto

Efeitos V/Q são diferentes para o CO₂ vs O₂:

- Conteúdo sistémico de O₂ depende fortemente da hemoglobina e da relação V/Q; tende a atingir um plateau à medida que V_E e V_A aumentam com VNI
- Conteúdo arterial sistémico de CO₂ depende menos da V/Q diminui progressivamente à medida que a V_E e a V_A são aumentadas pela VNI

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI Descarrega Musculatura Ventilatória

Falência da musculatura respiratória:

- incapacidade dos músculos respiratórios em gerar a P_{mus} necessária para as necessidades ventilatórias

2 mecanismos de falência da musculatura respiratória:

- fadiga muscular por *overload* muscular
- diminuição do drive ventilatório para proteger os músculos da fadiga

» desequilíbrio entre capacidade dos músculos respiratórios e a carga neles imposta



EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI Descarrega Musculatura Ventilatória

Elevadas cargas resistivas	Elevadas cargas elásticas
DPOC Asma Obstrução grandes vias aéreas	ILD Edema pulmonar cardiogénico ARDS

» a pressão inspiratória (P_i) necessária pode ser substancial

- Cargas impostas por assincronia doente-ventilador » contribui para a necessidade de elevada P_i
- Se PEEP intrínseco: vencê-lo contribui para pressão necessária para respirar

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI Descarrega Musculatura Ventilatória

VNI descarrega músculos respiratórios, pois:

- reduz o número de esforços do doente necessários
- para um determinado VT, reduz a carga muscular durante um ciclo assistido

» reverte fadiga

» reverte a redução do drive neural para prevenir fadiga

Controvérsia sobre a quantidade de *unloading* que é ideal:

- *Unloading* total não é desejável: aumenta risco de disfunção diafragmática induzida pelo ventilador e/ou atrofia diafragmática
- No outro extremo, *unloading* insuficiente potencia falência muscular e pode levar a dano muscular permanente

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI Faz *Reset* ao Sistema de Controlo Ventilatório - Agudo

A capacidade da VNI de tornar as trocas gasosas adequadas e descarregar os músculos pode ter efeitos profundos no centro de controlo ventilatório (CCV).

Reduzir a hipercapnia e a hipoxemia vai diminuir a intensidade e a frequência do output do CCV.

Unloading noturno de músculos cronicamente sobrecarregados:

- *reset* do CCV para PaCO₂ e V_A mais normais durante o dia

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

VNI Faz *Reset* ao Sistema de Controlo Ventilatório - Crónico

Hipercapnia por DPOC grave: sensibilidade dos quimiorreceptores pode estar diminuída

Doentes têm menor resposta ventilatória (sensibilidade) ao aumento da PaCO₂

DPOC com hipercapnia são aqueles que tipicamente têm limitação mecânica mais grave:

- difícil perceber em que medida é que a limitação mecânica versus diminuição da quimiossensibilidade afetam este *blunting* da resposta ventilatória

Neuroplasticidade pode ter um papel nesta resposta alterada

Reset do drive central: iniciado pela normalização da PaCO₂ durante a noite, que persiste durante o dia

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

Recrutamento Alveolar

Vantagens recrutamento alveolar e prevenção de desrecrutamento por PEEP:

- melhoria V/Q e trocas gasosas
- prevenção atelectotrauma (por *shear* stress de abertura e encerramento repetitivos)
- previne quebra do surfactante nos alvéolos colapsados » ↑ complacência pulmonar

Otimizar PEEP é um equilíbrio entre

- recrutar alvéolos em zonas doentes,
- sem sobredistender alvéolos previamente das regiões saudáveis

EFEITOS FISIOLÓGICOS DA PAP

Mitigar P-SILI

Na respiração espontânea, PEEP mitiga lesão pulmonar:

- gera recrutamento pulmonar
- previne a ocorrência de fenômeno de pêndulo
- previne a ocorrência de outras heterogeneidades na ventilação
- aumento de volume pulmonar induzido por PEEP produz desvantagem do diafragma em termos da sua relação força-comprimento » ↓o esforço inspiratório e o volume corrente, ficando o drive respiratório inalterado (crucial para reduzir o risco de P-SILI durante a fase precoce de ARDS/HARF)

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

Manutenção de Patência da VAS

MAS...

PAP pode induzir estreitamento dinâmico da laringe (obstrução laríngea induzível)

Têm-se observado respostas obstrutivas, quer em saudáveis quer em DNM, na inspiração e na expiração:

- recuo da língua
- movimentos epiglote
- adução pregas vocais

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

Manutenção de Patência da VAS

PAP previne obstrução, mas pressões terapêuticas mais elevadas aumenta o stress em estruturas flexíveis (pe faringe e laringe), causando deformação e estreitamento da VA » ↑ R

Apesar de a PAP ser essencial para manter a patência da VA, deve ser cuidadosamente titulada para:

- otimizar os efeitos terapêuticos
- minimizar o stress biomecânico

EFEITOS FISIOLÓGICOS VNI

Reduzir Cargas de *Triggering* impostas por Auto-PEEP

Doentes têm que diminuir a pressão alveolar abaixo do nível de auto-PEEP para que a pressão na máscara desça para desencadear o ciclo assistido

Pode ser intolerável para os músculos inspiratórios » exaustão respiratória

- Fornecer PEEP extrínseco abaixo do nível de auto-PEEP:
 - » gradiente entre a pressão alveolar e a pressão na máscara é diminuído
 - » reduz a carga de *trigger* imposta

RESUMO EFEITOS

CPAP e VNI

CPAP

Efeitos Terapêuticos

Efeito Terapêutico	Comentário
Aumento pressão intra-torácia	<ul style="list-style-type: none">• <i>injured lung</i>: ↑ volume pulmonar tele-expiratório, através da reabertura de alvéolos colapsados• ↑ a complacência pulmonar, ↓ o shunt pulmonar » otimiza a relação V/Q
Redução atelectotrauma	minimiza a abertura e encerramento cíclicos de regiões pulmonares atelectasiadas
Pode melhorar a clearance de CO ₂ e o pH	provavelmente por melhorar mecânica respiratória relação e V/Q
Diminuição da resistência vascular pulmonar	por melhoria da oxigenação e consequente ↓ da vasconstrição hipóxica
Redução da resistência da VA	por ↓ o edema intersticial devido à acumulação de fluido da região peri-brônquica

BINÍVEL

Efeitos Terapêuticos

Benefícios PEEP

- Maior ventilação/minuto
- Maior clearance CO₂
- Maior redução do esforço inspiratório e do WOB

Pode reduzir o efeito de pêndulo ao diminuir o esforço inspiratório, mas...(Ptp!)

BINÍVEL

Efeitos Terapêuticos na Hiperinsuflação

BPAP interrompe mecanismos de hiperinsuflação dinâmica (é agravada por aumento do drive respiratório, VC e RR)

Aplicação de PEEP extrínseca:

- pode ↓ PEEPi ao manter abertas as pequenas VA e ajudar a manter volumes pulmonares tele-expiratórios relativamente estáveis
- pode ↓ o *threshhold* inspiratório causado pela diferença entre a pressão alveolar e da via aérea durante VNI na presença de *air trapping* dinâmico » ↓ WOB

Mas aplicação de PEEP em doentes obstrutivos pode ter efeitos variáveis
PEEP deve ser 80% da PEEP intrínseca

EFEITOS HEMODINÂMICOS

PAP/VNI

EFEITOS HEMODINÂMICOS PAP

Efeitos PAP Coração Esquerdo

Pressão transpulmonar (PtP): diferença entre pressão alveolar e a pressão pleural

Pressão transmural (PTm): diferença de pressão entre o interior e o exterior de câmaras cardíacas ou grandes vasos;

Pressão transmural do VE (representa a pós-carga) é a diferença entre pressão intracavitária do VE e a pressão transpulmonar

- PEEP » ↑ pressão alveolar » ↑ PtP »
↓ diferença entre a pressão intraventricular VE e PtP » ↓ PTm do VE »
↓ pós-carga, ↑ contractilidade miocárdio » ↑ VS
- PEEP » ↓ volume tele-diastólico do VE (pré-carga): particularmente benéfico em doentes com função VE preservada

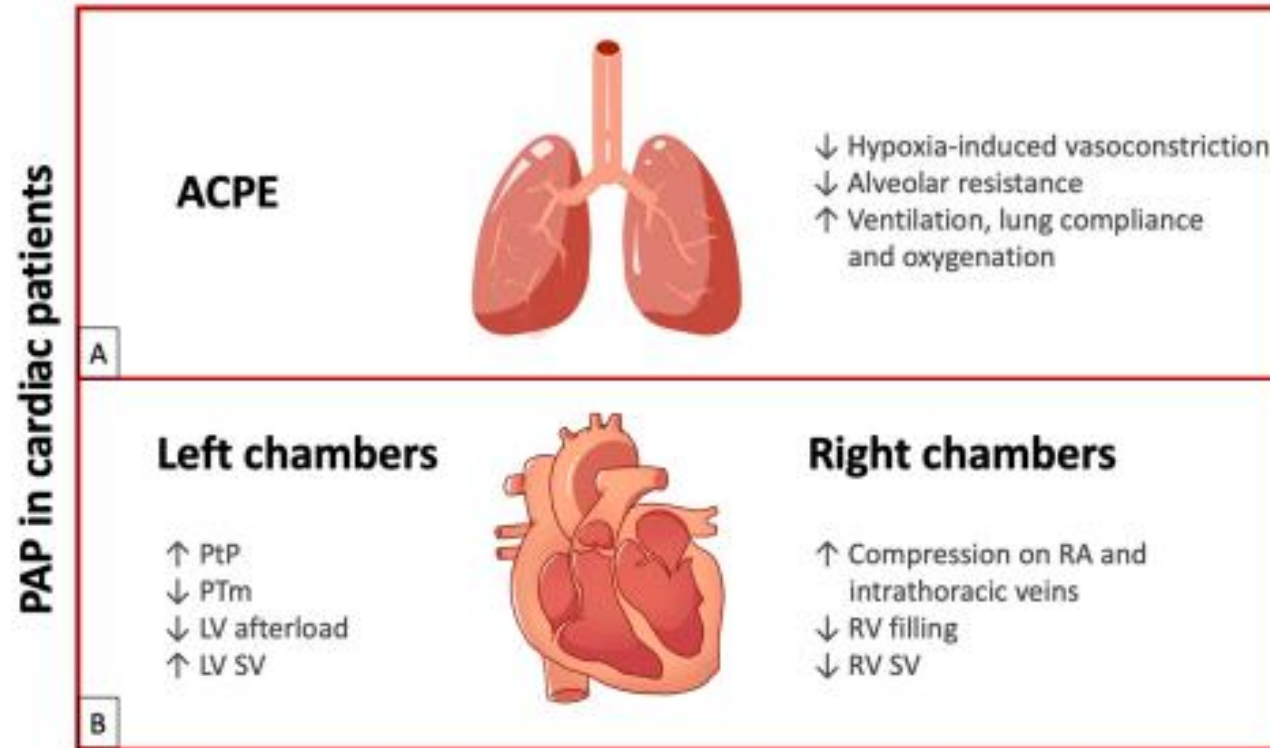
EFEITOS HEMODINÂMICOS PAP

Efeitos PAP Coração Direito

- » PEEP » ↑ PtP » efeito compressivo na AD » ↑ pressão auricular » ↓ retorno venoso
- » PEEP » ↑ PtP » pode comprimir veias intratorácicas (VCS e VCI) » ↑ resistência ao retorno venoso
Consequentemente: ↓ enchimento VD » ↓ VS do VD
- » PEEP » hipertensão pulmonar » overloading VD » ↑ regurgitação tricúspide

EFEITOS HEMODINÂMICOS PAP

Resumo



EFEITOS ADVERSOS

PAP/VNI

EFEITOS ADVERSOS VNI

Lesão Pulmonar Induzida pelo Ventilador

O pulmão pode ser lesado quando sobredistendido:

Ar extra-alveolar:

- rutura alveolar: pneumomediastino, enfisema subcutâneo, pneumotórax, embolia gasosa
- risco de ar extra-alveolar aumenta em função da magnitude e duração da sobredistensão alveolar
- interação entre a mecânica do sistema respiratório e a estratégia de ventilação mecânica (elevados VT e PEEP regionais, aplicados e/ou intrínsecos) que produzem regiões de elevada distensão alveolar por períodos prolongados

EFEITOS ADVERSOS VNI

Lesão Pulmonar Induzida pelo Ventilador

O pulmão pode ser lesado quando sobredistendido:

Lesão parênquima pulmonar:

- produzida por pressões transpulmonares menores que no caso anterior
- também em contexto de estiramento pulmonar máximo excessivo (pressão transpulmonar tele-inspiratória excedendo os limites máximos), estiramento tidal excessivo ou colapso/reabertura de alvéolos lesados
- dano alveolar difuso » libertação de citocinas e translocação de bactérias

EFEITOS ADVERSOS VNI

Produção de Auto-PEEP

Elevados níveis de V_E pela VNI podem levar ao desenvolvimento de auto-PEEP

- especialmente em doentes com tempos expiratórios inadequados, ou
- unidades pulmonares com constantes de tempo expiratórias excessivamente longas

Desenvolvimento auto-PEEP » VT progressivamente menores

CONCLUSÕES

VNI/PAP:

- Inúmeras vantagens
- Em diversas patologias
- Compreender os mecanismos das patologias e mecanismos da ação da VNI
- Titulação de parâmetros cuidadosa e individualizada
 - ✓ Otimizar benefícios
 - ✓ Minimizar riscos

CURSO DE VMNI

NIPPON 2026



Fisiologia da Ventilação Mecânica Não-invasiva



Miguel Guia

*Coordenador Unidade de Ventilação Não Invasiva, Serviço de
Pneumologia, ULS Santa Maria*

*Cocoordenador Unidade de Internamento Enfermaria, Serviço
de Pneumologia, ULS Santa Maria*

Faculdade de Medicina Universidade de Lisboa

Serviço de Pneumologia Hospital da Luz - Clínica da Amadora

